

Akseli Pitkänen

VAIHTOVETURIN VOIMANSIIRTO- RATKAISUT

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Prof. Jouni Mattila
Tarkastaja: Prof. Kalevi Huhtala
Marraskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Akseli Pitkänen: Vaihtoveturin voimansiirtoratkaisut
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan DI tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2020

Tämän diplomityön tarkoituksena oli kehittää ja tutkia uusia konsepteja vaihtoveturin voimalinjan toteuttamiseksi. Vaihtoveturit ovat tavallisia vetureita kevyempi ja halvempi ratkaisu tehdas-alueella tai ratapihalla tehtävään vaihtotyöhön. Tyypillisesti vaihtoveturit toimivat dieselmoottorilla, sillä ratapihojen useiden rinnakkaisten raiteiden sähköistys ei yleensä ole kannattavaa. Työssä käytetään esimerkkitieturina Teräspyörän valmistamaa OTSO-robot tuoteperhettä, jotka ovat toimineet tähän saakka dieselmoottorilla ja hydrostaattisella voimansiirrolla.

Tutkimus etenee systeemisuunnittelun V-mallin ensimmäisten vaiheiden mukaisesti systemin analysoinnista korkean tason suunnitteluun. Prosessia voidaan myöhemmin jatkaa V-mallin mukaisesti asiakastarpeen mukaan. Tutkimus aloitettiin perehtymällä vaihtovetureilla tehtävään työhön sekä rautatieympäristön ominaisuuksiin. Tämän jälkeen tutkittiin yleisiä vetureissa käytettyjä voimalinjaratkaisuja sekä tyypillisiä veturin rakenneratkaisuja. Arkkitehtuuri oli OTSO-robot malliston osalta jo olemassa, joten riitti tarkastella malliston rakenneratkaisuja. Viimeisen vaiheen tutkimuksessa työ jaettiin kahteen osaan, energianlähteisiin sekä voimansiirtoon. Energianlähteillä tarkoitetaan erilaisia tapoja tuottaa energiaa veturille tai varastoida energiaa veturin kyytiin. Energianlähteiden osalta tutkimus saatettiin tasolle, jolla voidaan esitellä asiakkaalle vaihtoehtoisia energianlähteitä. Voimansiirto tässä tarkoittaa energian siirtämistä energianlähteeltä akselille. Voimansiirtoon pyrittiin löytämään yksi ratkaisu, jonka avulla olisi helppo toteuttaa eri energianlähdevaihtoehdot olemassa olevan veturimalliston pohjalta.

Tutkimuksen tuloksena on luotu alustavat konseptit eri energianlähderatkaisuille sekä tutkittu näiden hyötyjä ja haittoja vaihtoveturissa. Voimansiirron osalta löydettiin ratkaisu, joka sopii helposti vanhaan runkoon ja sopii yhteen kaikkien työssä esiteltyjen energianlähteiden kanssa.

Avainsanat: veturi, vaihtoveturi, voimansiirto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Akseli Pitkänen: Shunting locomotive drivetrains
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree in Mechanical Engineering
November 2020

The main goal of this Master's thesis was to develop new drivetrain concepts for shunting locomotive application. Shunting locomotives are typically used in industrial railyards to move rail wagons. Traditionally these locomotives have used diesel as main energy source as the electrification of railyards is usually not economically viable. In this thesis OTSOrobot from Steelwheel was used as an example of shunting locomotive.

This thesis is based on Systems engineering V-model and consists of the first few steps of the V-model from system analysis to high level design. Later it is possible to continue with next steps of the V-model after customer demand is known. The study was started by analyzing the shunting work and railroad specialties. After this, typical locomotive drivetrains were analyzed as well as typical locomotive structure. The architecture of the example locomotive used in this thesis is a ready product, so it was only needed to analyze this basic structure as architecture design. In the last phase of this thesis the work was divided into two sections, energy sources and drivetrain. Energy sources in this thesis consist of how the energy needed in this locomotive is produced or stored on to the locomotive. The goal for this part was to develop concepts ready enough to be introduced to customer. Drivetrain part in this consist of how the energy from the source is turned into torque on axle. The goal was to find one solution for drivetrain that would be widely used on with all different energy sources and that fits the old locomotive well into the old locomotive architecture.

The result of the thesis was that many different energy source concepts are in the stage to be introduced for customer and they have been evaluated how they fit into shunting locomotive application. For the drivetrain, one concept was found that fits well into the old frame and can be used with all the energy sources introduced in this thesis.

Keywords: locomotive, shunting locomotive, drivetrain

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Saalastin sekä Teräspyörän kanssa. Ensimmäiset ideoinnit työn pohjaksi tehtiin jo vuonna 2019, mutta varsinainen diplomityö on tehty kesän ja syksyn 2020 aikana. Työn tekeminen on ollut mielenkiintoista ja toi paljon kokemusta uuden järjestelmän konseptoinnista sekä suunnittelusta.

Haluan kiittää Mikko Karhua työn ohjaamisesta sekä Timo Saalastia työn aihepiiriin perehdyttämisestä. Kiitän myös kaikkia Saalastin sekä Teräspyörän organisaatioissa, jotka ovat auttaneet työn tekemisessä ja tuoneet vaihtelua päiviin kahvitauoilla. Erityiskiitoksen ansaitsee työni ohjaaja Jouni Mattila Tampereen Yliopistolta, joka oli korvaamaton apu diplomityöprosessissa. Häneltä sain hyvin paljon apua työn sisällön jäsentämisessä sekä ulkoista näkökulmaa työkonemaailmasta.

Aloitin ensimmäiset korkeakouluopintoni Metropolia AMK:ssa vuonna 2012, joten opintojen saattaminen valmiiksi on ollut vuosien työ. Haluan kiittää läheisiäni kaikesta tänä aikana saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Hyvinkäällä, 6.11.2020

Akseli Pitkänen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKIMUSMENETELMÄ SEKÄ TUTKIMUKSEN RAJAAMINEN	2
3. SUUNNITTELUPROSESSI	5
3.1 Vaatimusten määrittely	5
3.1.1 Vaihtoveturilla tehtävä työ	5
3.1.2 Nopeusvaatimus	6
3.1.3 Kitka	7
3.1.4 Vetovoima ja vääntömomentti	8
3.1.5 Käyttösyklit ja tehon säätö	9
3.1.6 Päästöluokat	13
3.1.7 Vastusvoimat	13
3.1.8 Junan välykset	15
3.1.9 Ulottuma	16
3.2 Systeemin analysointi	16
3.2.1 Tyypillinen veturin rakenne	16
3.2.2 Sähköveturi	18
3.2.3 Diesel-sähköinen veturi	19
3.2.4 Hydrodynaaminen voimansiirto	21
3.2.5 Hydrostaattinen voimansiirto	23
3.3 Arkkitehtuurin mallinnus	24
3.4 Ylätason suunnittelu (Energianlähteet)	27
3.4.1 Energianlähteet	27
3.4.2 Dieselmoottori	28
3.4.3 Kaasumoottori	31
3.4.4 Sähkö	31
3.4.5 Akku	32
3.4.6 Polttomoottori-akku hybridi	33
3.4.7 Polttokenno	36
3.5 Ylätason suunnittelu (Voimansiirto)	38
3.5.1 Nykyinen diesel -hydraulinen voimansiirto	38
3.5.2 Hydrodynaaminen	41
3.5.3 Sähkö-hydraulinen voimansiirto	42
3.5.4 Sähköinen napamoottori	43
3.5.5 Akselin suuntainen sähkömoottori	46
3.5.6 Ketjuveto	48
4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	50
5. YHTEENVETO	53
6. LÄHDELUETTELO	54

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: Systeemis suunnittelu V-malli [1].....</i>	<i>2</i>
<i>Kuva 2: Työssä käytettävä V-malli, suomennettu [2].....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 3: SSAB Borlänge tehdasalue ja tämän raidekartta [3] [4].....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 4: OTSO-robot paikoittaa vaunuja purkuasemalla (Kuva Teräspyörä Oy)</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 5: Akselin pyörintänopeus veturin ajonopeuden funktiona.....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 6:Vaihtoveturin kuormitus [4]</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 7:Linjaveturin kuormitus [4].....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 8: Mitattu vaihtoveturin tehonkäyttö [4].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 9:Vaihtoveturin työskentelyjakson tehonkäyttö tehoportaissa [4].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 10: Vaihtoveturin tehonkäyttö työskentelyjaksolla [12]</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 11:Vaihtoveturin generaattoritehon prosentuaalinen osuus työjaksolla [12]</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 12: Tavarajunatonnin kulkuvastus nopeuden funktiona.....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 13: Veturin vetovoimakuvaaajan ja junan vastusvoimien vertailu [15].....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 14: Telialustaisen veturin periaatekuva [17]</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 15: Veturin teli [16].....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 16: Kolmiakselinen teli kaarteessa [16].....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 17: Sähköveturin pääkomponentit [19].....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 18: Sähkömoottorien asettelu telissä [16]</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 19: SKF huoltovälin mitoitus eri moottorin kytkennöillä [20].....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 20: Diesel-sähköisen veturin pääkomponentit [19].....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 21: Energian kulku diesel-sähköisessä veturissa [22]</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 22: Voith Turbo -vaihteiston periaatekuva [20]</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 23: Tyypillinen diesel-hydrodynaaminen voimansiirto [20].....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 24: OTSO-Robot 50 yleiskuva</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 25: OTSO-robot 50 päämittakuva</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 26: OTSO-robot 75 päämittakuva</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 27:OTSO-robotin jousitus</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 28: Vetureissa käytettyjen polttoaineiden historia [19, p. 63].....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 29: Erään dieselmoottorin hyötysuhdekartta [24]</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 30: Saman tehon tuottaminen eri hyötysuhteilla ja kierrosluvulla, muokattu [24].....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 31: Vaihtoveturi virtakaapelikelalla [25].....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 32:Moottorin kuormituksen lisääminen [24], muokannut Akseli Pitkänen</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 33: Diesel-akku-superkondensaattori -hybridivoimansiirto [26]</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 34: Danfoss EM-PMI375-T200 -moottori/generaattori [27].....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 35: Energian kulku ja järjestelmän kytkennät polttokenno-akku hybridissä [12].....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 36: Eri energiavarastojen tehon käyttö [12].....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 37: OTSO-robotin hydrostaattinen voimansiirto</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 38: OTSO-robotin hydrostaattisen moottorin asennus</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 39: Dieselmoottori ja hydrauliliikkipumput.....</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 40 Black Bruin BB6 -moottorin vääntö pyörimisnopeuden funktiona [30]</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 41: Hydrodynaaminen voimansiirto OTSO-robotin rungossa</i>	<i>42</i>
<i>Kuva 42: Sähköinen napamoottori</i>	<i>43</i>
<i>Kuva 43: Sähköisen napamoottorin asennus.....</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 44: Rotatrac eGFT planeettavaihte [34]</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 45: Rotatrac eGFT sivukuvanto [34].....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 46: Bosch SMG 280/200 vääntömomentti- ja hyötysuhdekuvaaja [35].....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 47: Akselin suuntainen moottori OTSO-robotissa.....</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 48: Akselin suuntaiset moottorit levennetyssä rungossa</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 49: Ketjuvedon toteutus 2-akselisessa veturissa.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 50: Akselin ja ketjun liikesuunnat</i>	<i>48</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>a</i>	kiihtyvyys
<i>F</i>	voima
<i>m</i>	massa
<i>km/h</i>	<i>nopeus, kilometriä tunnissa</i>
<i>t</i>	<i>tonni, massa</i>
<i>kW</i>	<i>teho, kilowatti</i>
<i>rpm</i>	<i>kierrosluku, kierrosta minuutissa</i>
<i>g</i>	<i>putoamiskiihtyvyys</i>
<i>v</i>	<i>nopeus</i>

1. JOHDANTO

Vaihtotyö on ratapihoilla ja tehdasalueilla tapahtuvaa junavaunujen siirto- ja järjestelytyötä. Tähän työhön voidaan käyttää erilaisia vinttureita, vaihtovetureita tai tavallisia vetureita. Tässä työssä tarkastellaan vaihtovetureita, joita käytetään pelkästään tähän työhön. Vaihtovetureina käytetään täysin tähän työhön räätälöityjä vetureita tai tavallisista vetureista muokattuja vetureita. Vintturiin verrattuna vaihtoveturi on nopeampi, eikä sitä sido vaijerin kulkureitti ja radan geometria. Tavalliseen veturiin verrattuna vaihtoveturi taas on hitaampi ja pienitehoisempi.

Suomessa vaihtovetureita valmistaa Teräspyörä Oy, jonka OTSO-robot tuoteperhe toimii tässä työssä esimerkkiveturina. OTSO-robot vaihtoveturit ovat täysin vaihtotyöhön räätälöityjä, pääasiassa kauko-ohjauksella toimivia vetureita, joita on käytössä erilaisilla tehdasalueilla. Näitä valmistetaan kokoluokassa 50-150 tonnia. Tavalliseen linjaveturiin verrattuna OTSO-robotit ovat huomattavasti pienempiä, hitaampia ja edullisempia sekä hankintahinnaltaan, että käyttökustannuksiltaan.

Ilmastonmuutoksen ja ympäristökehityksen myötä myös OTSO-robotin käyttäjäkunta on siirtymässä kohti ilmastoystävällisempiä toimintatapoja. OTSO-robotteja on ollut tähän asti ollut tarjolla vain dieselmoottorilla ja hydrostaattisella voimansiirrolla. Asiakaskysynnän myötä tässä työssä tutkitaan erilaisia konsepteja toteuttaa OTSO-robotin voimalinja ympäristöystävällisemmin sekä energiatehokkaammin. Näitä konsepteja voidaan tämän jälkeen käyttää havainnollistamaan erilaisia ratkaisuja asiakkaille sekä suunnittelun pohjana.

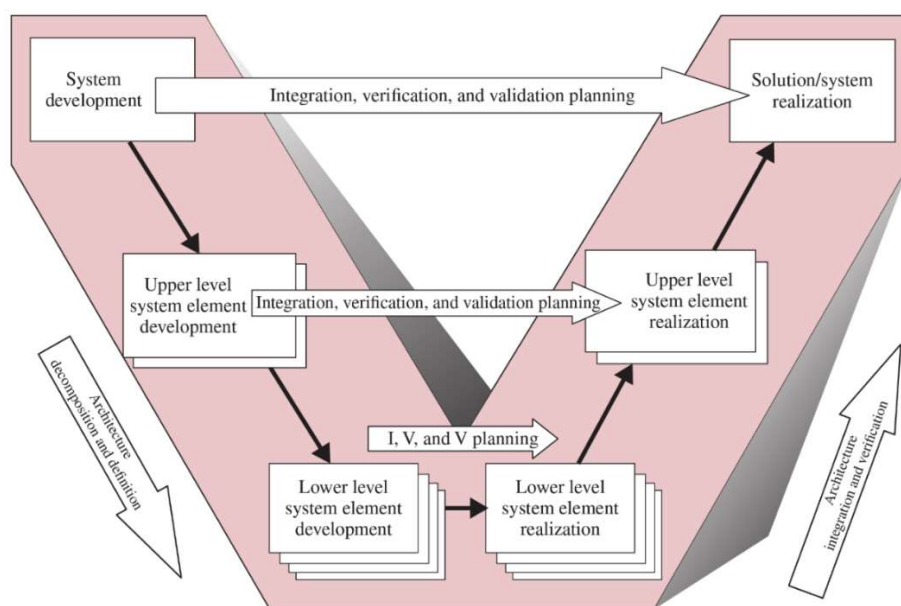
Diplomityö koostuu 5 luvusta. Johdannon jälkeen työn toisessa luvussa määritellään työn sisältö sekä käytettävä suunnitteluprosessi, jota työ seuraa. Kolmannessa luvussa käydään läpi suunnitteluprosessin mukaiset työvaiheet. Neljännessä on koottu diplomityössä luodut konseptit sekä arvioidaan näitä. Viidennessä luvussa kootaan diplomityöprosessissa löydetyt havainnot sekä pohditaan mahdollisia jatkotutkimuksia.

2. TUTKIMUSMENETELMÄ SEKÄ TUTKIMUKSEN RAJAAMINEN

Diplomityön tutkimuksen rakenne pohjautuu systeemisuunnittelun (englanniksi Systems Engineering) V-malliin, jonka alkuperäinen versio on esitetty kuvassa 1. Mallin esittämää prosessia käytetään yleisesti ohjelmistosuunnittelussa, mutta sitä voidaan soveltaa ja muokata myös muihin suunnittelu- tai projektisovelluksiin.

V-mallissa projekti lähtee liikkeelle V:n vasemman kyljen yläpäästä, kulkee vasenta puolta alas ja oikeaa kylkeä takaisin ylös. V-malli korostaa jatkuvaa varmistamista asiakkaalta, testauksen suunnittelua ja riskienhallintaa. Mallissa aika ja projektin valmistuminen liikkuvat oikealle, ja periaatteessa työntekijä pystyy liikkumaan vain pystyakselilla. Vasemmalla kyljellä työskenneltäessä ylöspäin tarkoittaa varmistusta asiakkaalta sekä edellisen työvaiheen määritelmistä ja alaspäin liikkuminen edistymistä seuraavaan vaiheeseen. Kun kaikki osatekijät voivat liikkua alaspäin, V etenee luonnostaan oikealle alaviistoon. Kussakin vasemman kyljen työvaiheessa luodaan samalla varmistus- tai testausmenetelmä oikealle kyljelle, jotta voidaan varmistaa myöhemmin kyseisen osan toiminta ja varmistua vaatimusten täyttymisestä. [1]

V:n alimmassa osassa tapahtuu kaiken pienimpien detaljien suunnittelu tai osien valmistus. Tämän jälkeen rakennetaan projektia oikeaa kylkeä ylöspäin, validoimalla koko ajan vasemmalla kyljellä luotujen validointimenetelmien mukaisesti pienimmästä detaljista kohti koko systeemiä. [1]



Kuva 1: Systeemisuunnittelu V-malli [1]

Kuvassa 2 on esitetty toisesta lähteestä oleva, enemmän mekaanisten systeemien suunnitteluun räätälöity V-malli, jonka pohjalle tämä diplomityö rakentuu. Vaiheet on suomennettu mukaillen Ohjelmistotuotanto -kirjan V-mallin vaiheita [2]. Tässä mallissa on tarkemmin esitetty mekaanisen laitteiston tai systeemin vaatimat työvaiheet verrattuna kuvan 1 malliin.

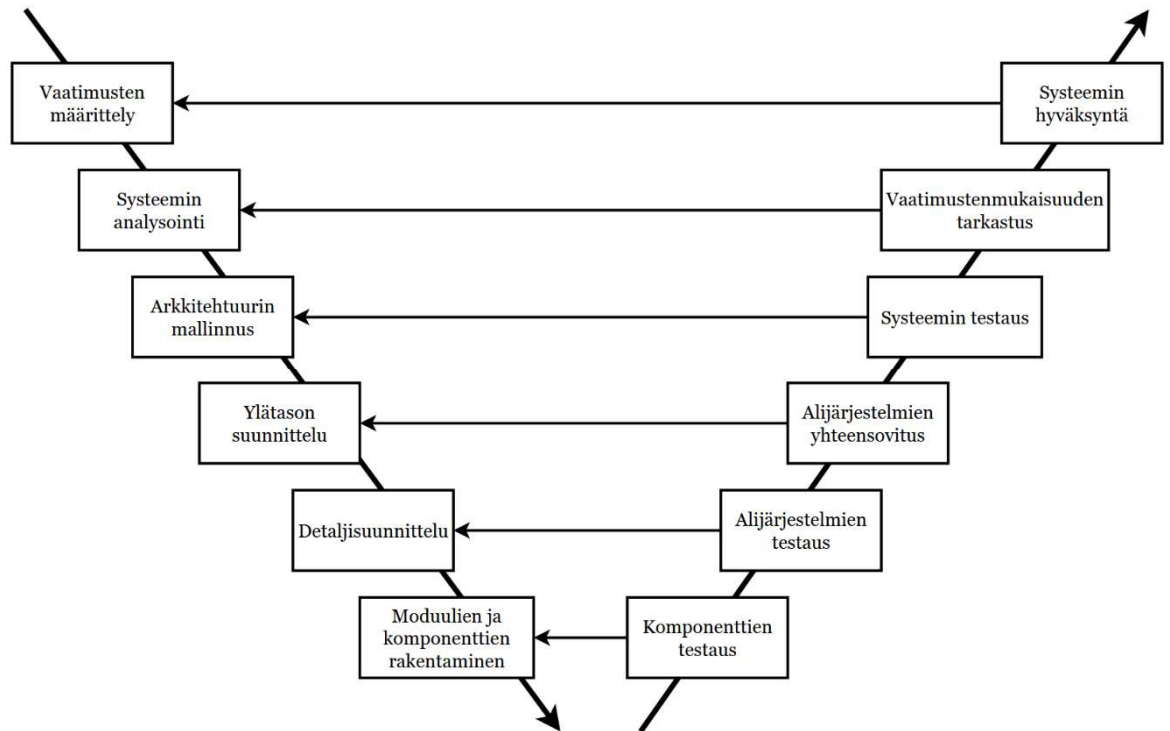
Tämän diplomityön tutkimuksen tavoitteena on luvun 1 mukaisesti luoda erilaisia konsepteja vaihtoveturin voimanlähteeksi, joita voidaan tarjota asiakkaalle ja käyttää detajisuunnittelun pohjana. Tämä vaatii myös vaihtoveturin voimansiirron tarkastelun sekä eri toteuttamisvaihtoehtojen tarkan läpikäynnin, jotta käytettävä voimansiirto sopii mahdollisimman tehokkaasti kaikille tarjotuille voimanlähteille.

Työn pohjana on valmis tuote (OTSO-robot), jonka runkoon luodaan uusia teknologioita. Valmiin tuotteen kanssa olisi mahdollista jättää ensimmäisiä V-mallin työvaiheita vähemmälle huomiolle. Tässä tutkimuksessa käydään kuitenkin kaikki työvaiheet läpi, jotta varmistutaan tehtävien päätösten oikeellisuudesta ja suunnittelun lähtöarvoille saadaan varmistus.

V-mallin toimintatavan mukaisesti ylhäältä varmistetaan asiakastarve ennen kuin voidaan jatkaa prosessissa oikealle. Tässä vaiheessa veturin uusien konseptien kehitysprosessia on selvillä seuraavat asiakastarpeet:

1. Vaatimusten määrittely: Asiakkailla on edelleen tarve vaihtoveturille, joka toimii tehdasympäristössä
2. Systeemin analysointi: Dieselin tilalle tarvitaan uusia polttoaineita
3. Arkkitehtuurin mallinnus: Olemassa oleva vaihtoveturi on konseptina toimiva ja sen pohjalle voidaan rakentaa uutta

Ylätason suunnittelu -tasoa pidemmälle ei kuitenkaan ole asiakkaalta varmistusta. Lisäksi vaihtoveturi on tuotteena suhteellisen asiakasräätälöity tuote, mikä korostaa työn rajaamista tähän. Teknologiakohtaisen määrittelyn perusteet tulevat ilmi tässä työssä, jolloin asiakaskohtainen valinta ja detajisuunnittelu ovat suoraviivaisia ja haasteellisin tutkimustyö on tehty.



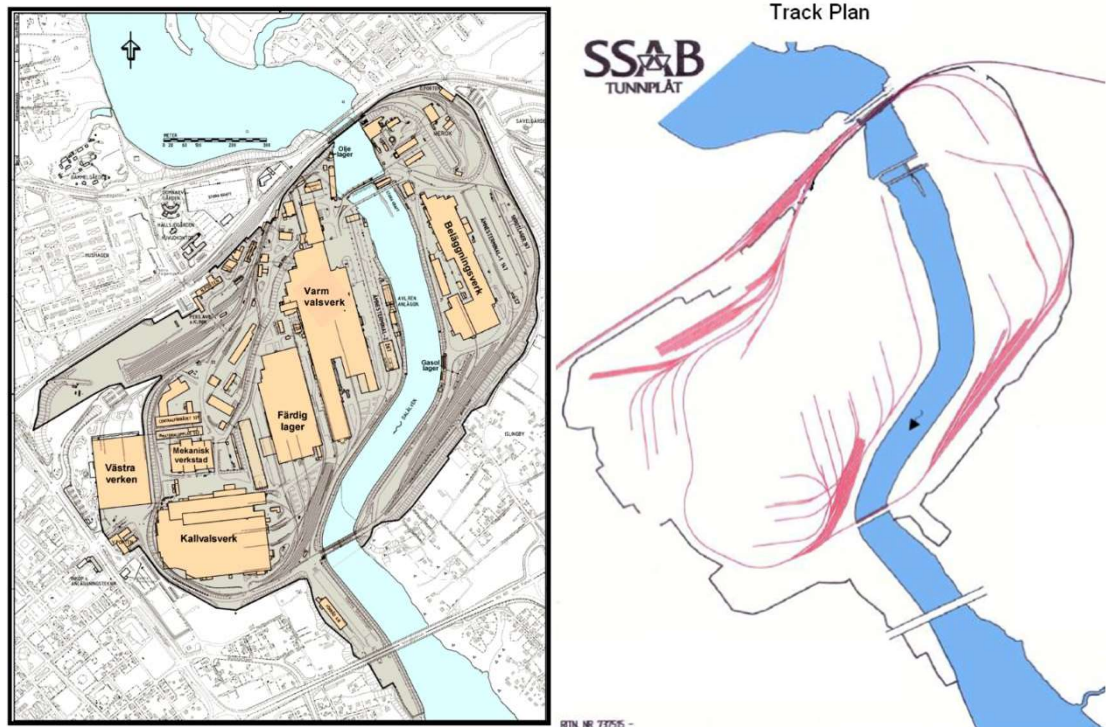
Kuva 2: Työssä käytettävä V-malli, suomennettu [3]

3. SUUNNITTELUPROSESSI

3.1 Vaatimusten määrittely

3.1.1 Vaihtoveturilla tehtävä työ

Vaihtoveturilla tehtävä siirtotyö tapahtuu rajatuilla alueilla, ratapihoilla tai tehtaiden sisällä. Kuvassa 3 on SSAB:n terästehtaan raidekartta, joka on hyvä esimerkki suuremman tehtaan rautatiestöstä. Vasemmalla on tavallinen kartta tehdasalueesta ja oikealla kyseisen tehtaan raidekaavio. Punaisella esitetyistä raidekaaviosta nähdään, kuinka monta raidetta on vierekkäin pienellä alueella. Osa raiteista menee myös hallien sisälle minkä näkee vasemmanpuoleisesta kartasta. Tällaisessa ympäristössä nopeudet ovat pieniä ja siirrettävät matkat suhteellisen lyhyitä, maksimissaan joitain kilometrejä. Kyseisessä työskentely-ympäristössä korostuu erityisesti liikkeellelähtökyky ja hitaan nopeusalueen suuri vetovoima. Liikkeellelähdössä vaihtoveturin vetovoimaa rajoittaa yleensä kiskopyörän ja kiskon välinen kitka.



Kuva 3: SSAB Borlänge tehdasalue ja tämän raidekartta [4] [5]

Vaihtovetureita voidaan käyttää paitsi vaunujen siirtoon ja järjestelyyn, myös tarkkuutta vaativaan siirtotyöhön, esimerkiksi paikoittamaan vaunuja lastaus- ja purkuasemille tai

hallien sisällä. Esimerkki purkuasematyöskentelystä on esitetty kuvassa 4. Tässä tutkimuksessa käsiteltävä OTSO-robot tuoteperhe on optimoitu erityisen hitaaseen työskentelyyn sen huippunopeuden ollessa vetokäytössä noin 15 km/h [6].



Kuva 4: OTSO-robot paikoittaa vaunuja purkuasemalla (Kuva Teräspyörä Oy)

Vaihtoveturilla tehtävän työn sijoittuminen esimerkiksi rajatulle tehdasalueelle mahdollistaa sen, että vaihtoveturi voidaan rekisteröidä työkoneeksi veturin sijasta. Tämän vuoksi vaihtoveturissa voidaan joiltain osin käyttää ei-rautatieliikenteeseen hyväksytyjä osia. Lisäksi uuden veturin käyttöönotossa voidaan tehdä kevyempi hyväksyntäprosessi kuin linjavetureilla. Tämä mahdollistaa vaihtoveturin rakentamisen huomattavasti laajemmalla komponenttivalikoimalla sekä pienemmillä kustannuksilla tavalliseen linjaveturiin verrattuna.

3.1.2 Nopeusvaatimus

Kuten edellä mainittiin, vaihtoveturin huippunopeus ei ole sen tärkeimpiä ominaisuuksia. OTSO-robotin noin 15 km/h vetonopeus on todettu käytössä riittäväksi. Lisäksi OTSO-robotissa on nopeampaa ajoa varten toinen siirtovaihte, jolloin huippunopeus nousee noin 20 km/h nopeuteen. Tällä vaihteella vetokyky on huomattavasti pienempi. Yleisen rataverkon ratapihoilla vaihtotyön maksiminopeus on 35 km/h tai tiettyjen ehtojen täyttyessä 50 km/h [7].

Vaadittu vaihtoveturin huippunopeus on kuitenkin asiakas- ja kohderiippuvainen ominaisuus. Voimansiirron ja tehojen osalta esimerkiksi liikenneviraston määrittämä huippunopeus 35 km/h voisi olla järkevä mitoitusperusta, ja mikäli tarve tulee, voidaan nopeutta rajoittaa alemmas tai rakentaa toinen vaihde siirtoajoa varten. Huippunopeutta määritettäessä pitää kuitenkin muistaa tehovaatimuksen kasvu nopeuden noustessa.

Akselin pyörimisnopeus on riippuvainen kiskopyörän halkaisijasta. Kiskopyörä on kuluva osa, joka sorvataan käyttöiän aikana useita kertoja oikeaan muotoon. Suomessa kiskopyörien halkaisijan on 25 t akselipainolla oltava vähintään 840 mm [8, p. 17]. Esimerkiksi OTSO-robotissa käytettävien kiskopyörien halkaisija on uutena 950 mm ja Fennia-railin DR18-veturien kiskopyörän halkaisija 1050 mm [9] [10].

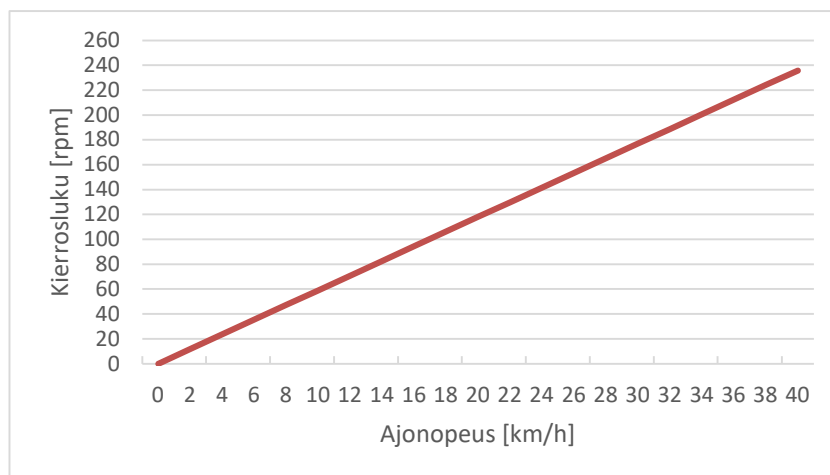
Akselin pyörimisnopeuden arvioinnissa käytetään tässä tapauksessa OTSO-robotissa käytettävän noin 0,9 m pyörän halkaisijaa. Akselin kierrosnopeus veturin ajonopeuden funktiona voidaan laskea kaavalla 3, joka on johdettu kaavoista 1 ja 2,

$$v_{m/s} = \frac{v_{km/h}}{3,6} \quad (1)$$

$$n_{rpm} = v_{m/s} * \frac{60}{2\pi r} \quad (2)$$

$$n_{rpm} = \frac{v_{km/h}}{3,6} * \frac{60}{2\pi r} = \frac{25}{3 * \pi * r} v_{km/h}, \quad (3)$$

joissa $v_{m/s}$ on nopeus metreinä sekunnissa, $v_{km/h}$ on nopeus kilometriä tunnissa, n_{rpm} on pyörimisnopeus kierrosta minuutissa ja r on pyörän säde. Kuvassa 5 on esitetty kaavan 3 mukaisesti laskettu kierrosnopeus nopeuden funktiona.



Kuva 5: Akselin pyörintänopeus veturin ajonopeuden funktiona

3.1.3 Kitka

Yleensä rautatiellä saavutettava kitkakerroin on välillä 0,1-0,4 [11]. Yksiselitteisen kitkakertoimen määrittäminen on kuitenkin mahdotonta, sillä rautatie sijaitsee yleensä ulkona.

Radan pinnassa voikin olla puhtaan radan sijasta ruostetta, märkiä lehtiä tai jäätä. Kiskopyörän ja kiskon välinen kontaktialue on vain noin 1 cm^2 ja näin kitkakerroin voi vaihdella hyvin suuresti ja hyvin nopeasti. Lisäksi rautatiekisko ja kiskopyörä ovat kulumisia osia, jotka ovat voineet kulua eri muotoisiksi, ja näin kosketuspinnan ala voi vaihdella.

Parhaan mahdollisen kitkakertoimen saavuttaminen edellyttää puhtaalla kiskolla pientä luistoa. Mittausten [11],[12] mukaan tämä tapahtuu noin 1–4 % luistolla. Pienen luiston ylläpitäminen on kuitenkin hyvin vaativaa kitkaparin luonteen vuoksi. Nykyaikaisilla sähkömoottoreilla sekä moottorinohjaimilla tämä on kuitenkin mahdollista toteuttaa.

Kitkaparin ominaisuuksien muuttamiseksi on kuitenkin olemassa joitain ratkaisuja. Hyvin monissa vetureissa, kuten myös OTSO-robotissa, on hiekoitinlaitteet kitkan lisäämiseksi. Näissä kiskopyörien edessä on suuttimet, joista puhalletaan yleensä paineilman avulla hiekkaa kiskopyörän ja kiskon välille. Toisaalta esimerkiksi Suomessa on junissa oltava voitelulaitteet kiskopyörän laipan voiteluun kulumisen estämiseksi ja melun pienentämiseksi [8, p. 18].

Tässä työssä pohjana käytetään 0,35 kitkakerrointa, joka on suhteellisen hyvin saavutettavissa moderneilla sähkömoottoreilla ja moottorinohjaimilla [11, p. 257]. Mikäli mitoituksessa käytettäisiin pienempää kitkakerrointa, saattaisi veturin massan tuomaa kitkavoimaa jäädä hyödyntämättä akselille tuotavan väännön loppuessa ennen sutimista. Toisaalta kyseinen 0,35 on suhteellisen hyvä kitkakerroin, jota suuremmalle kitkakertoimen arvolle voimansiirron mitoittaminen ei ole tarkoituksenmukaista.

3.1.4 Vetovoima ja vääntömomentti

Vaihtoveturin tärkeimpiä ominaisuuksia on suuri vetovoima liikkeellelähdössä. Vaikka tässä käsitelty vaihtoveturi on huomattavasti pienempitehoinen kuin linjaveturi, sillä tulisi kyetä vetämään yhtä painavia junia. Tämä edellyttää vaihtoveturilta yhtä suurta massaa kuin linjaveturilla, jolloin kitkavoimasta veturin ja radan välillä saadaan yhtä suuri.

Tässä tapauksessa vetovoiman määrittäminen OTSO-robotin yhden akselin osalta riittää, sillä kaikilla veturin akseleilla on yhtä suuri massa, joten tätä vetovoimaa voidaan monistaa akselien määrän verran. Akselikohtainen kitkan rajaama vetovoima voidaan määrittää kaavan 4 mukaisesti

$$F_{\mu} = \mu mg, \quad (4)$$

jossa akselipainon $m=25 \text{ t}$, kitkakertoimen $\mu=0,35$ ja gravitaatiovakion $g=9,81 \text{ m/s}^2$ tulona. Näin laskettu akselikohtainen kitkavoima on noin 86 kN.

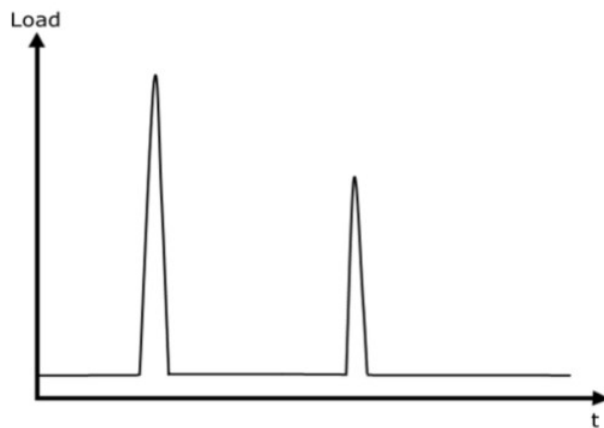
Kitkavoimasta voidaan laskea kaavalla 5 akselille tarvittava vääntömomentti maksimaalisen vetovoiman saavuttamiseksi.

$$M = F * \frac{D}{2}, \quad (5)$$

missä M on momentti, F on edellisessä laskettu kitkavoima ja D on pyörän halkaisija 0,9 m. Momentti on näin noin 39kNm, jota käytetään myöhemmin.

3.1.5 Käyttösyklit ja tehon säätö

Vaihtoveturin tyypilliset käyttösyklit eroavat huomattavasti tavallisen linjaveturin käyttösykleistä. Vaihtoveturin ajomatka on vain joitain kilometrejä ja suurin työ tehdään junaa kiihdyttäessä, jonka jälkeen energiankulutus pysyy pienenä. Linjaveturilla vastaavasti ajonopeus sekä -matka ovat huomattavasti pidempiä, jolloin veturi joutuu jatkuvasti tekemään työtä vastusvoimia vastaan nopeuden ylläpitämiseksi. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty tyypilliset kuormituskäyrät jollain ajanjaksolla vaihtoveturille sekä linjaveturille. Kuvista on nähtävissä myös kokonaisenergian käytön suuri ero työsyklin aikana, joka ilmenee kuvaajan integroituna pinta-alana.



Kuva 6:Vaihtoveturin kuormitus [5]



Kuva 7:Linjaveturin kuormitus [5]

Vetureille on määritetty erilaisia standarditestisyklejä. Erityyppisille vetureille on määritetty testisyklit eri tehoalueille suhteessa maksimitehoon. Tavanomaisen veturin tehonsäätö perustuu 8 kiinteään portaaseen, joiden välillä veturin kuljettaja valitsee. Tehoasetukset suhteessa maksimitehoon on nähtävissä seuraavassa taulukossa 1.

Taulukko 1:Veturin tehoasetukset [5]

Power Distribution by Notch								
Throttle Notch	1	2	3	4	5	6	7	8
Percent of Rated Power	4.5	11.5	23.5	35.0	48.5	64.0	85.0	100

Seuraavaan taulukkoon 2 on koottu eri testisyklit vertailua varten. Taulukosta huomataan, että Euroopassa kaikille vetureille käytettävälle ISO 8178-F -standarditestisyklille ei ole vaihtoehtoja syklillä vaihtovetureita varten. Amerikkalaiset EPA Switch, AAR Switch, RAC Switch sekä California Yard -syklit taas ovat täysin vaihtovetureille tarkoitettuja syklejä.

Taulukko 2:Standardipäästötestien vertailu [5]

Throttle Notch	ISO 8178-F	EPA Freight	AAR Freight	RAC Freight	GE Freight	EMD Freight	AAR 3-mode	EPA Switch	AAR Switch	RAC Switch	California Yard
8	25%	16%	28%	12%	14%	17%	25%	1%	0%	5%	2%
7	0%	3%	3%	4%	3%	4%	0%	0%	0%	2%	0%
6	0%	4%	3%	4%	3%	4%	0%	2%	1%	2%	0%
5	0%	4%	3%	4%	4%	4%	25%	4%	1%	2%	1%
4	15%	4%	3%	4%	4%	4%	0%	4%	2%	2%	3%
3	0%	5%	3%	4%	3%	4%	0%	6%	4%	2%	3%
2	0%	7%	3%	4%	5%	4%	0%	12%	5%	2%	4%
1	0%	7%	3%	4%	5%	5%	0%	12%	10%	2%	4%
Dyn.Brk	0%	13%	8%	0%	4%	9%	0%	0%	0%	0%	0%
Idle	0%	0%	0%	60%	50%	46%	50%	0%	0%	81%	0%
Low Idle	60%	38%	43%	0%	0%	0%	0%	60%	77%	0%	82%

Tässä työssä tutkittavia erilaisia voimanlähdekonsepteja verrataankin näihin vaihtoveturisykleihin. Esille nousee mm. tyhjäkäynnin hyvin suuri osuus työsyklistä, matalat käytettävät tehoportaat sekä matala keskimääräinen teho, kuten taulukossa 3 on nähtävissä.

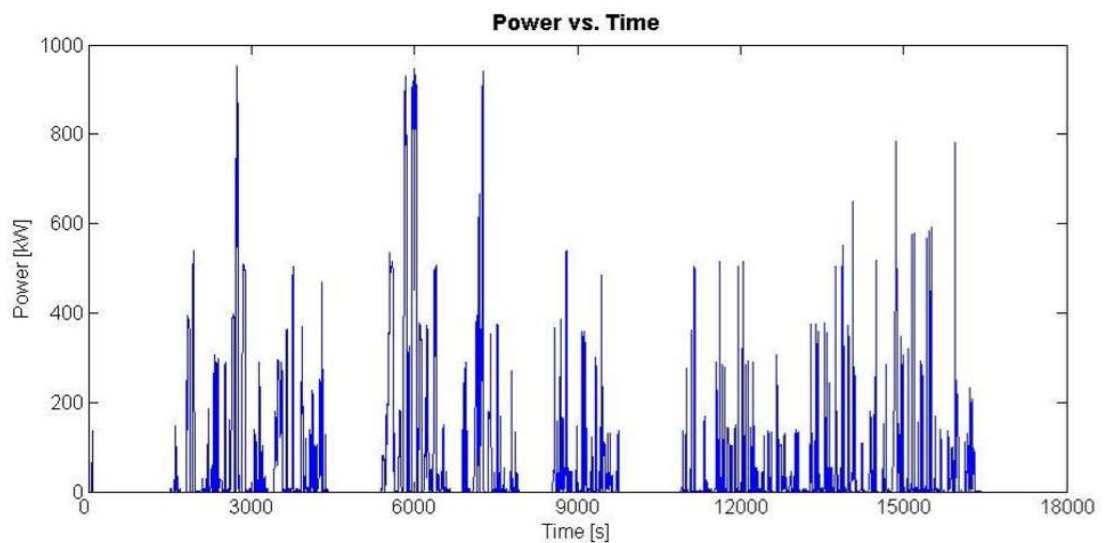
Taulukko 3: Eri standarditestien keskimääräinen teho [5]

ISO 8178-F	EPA Freight	AAR Freight	RAC Freight	GE Freight	EMD Freight	AAR 3-mode	EPA Switch	AAR Switch	RAC Switch	California Yard
30%	27%	36%	23%	23%	28%	37%	8%	4%	10%	5%

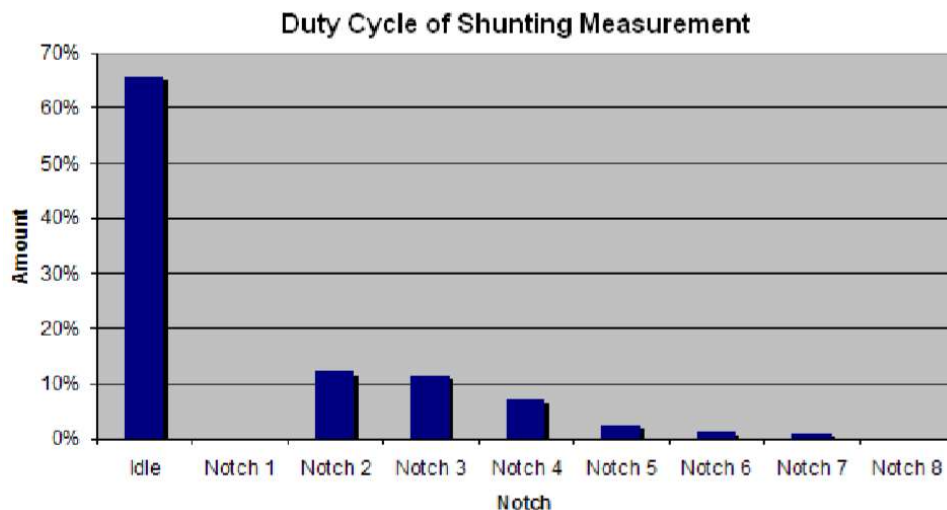
Lisensiaattityössä ”Evaluation of Test Cycles for Freight Locomotives” Mattias Skoglund on tutkinut erilaisten Ruotsissa käytettävien dieselveturien käyttösykliä vastaavuutta standarditestisykleihin. Työssä mitattiin sekä linja- että vaihtovetureista käyttödataa

useista eri kohteista, kuten veturin nopeus, polttomoottorin kierrokset, ajomoottorien kuormitus ja polttoaineen kulutus. Tätä dataa hyödyntämällä voitiin paitsi verrata tehonkäyttöä ja eri tehoasetuksien osuutta työsyklistä, myös arvioida veturin hyötysuhdetta.

Vaihtoveturin osalta tutkimuksessa huomattiin, että vaihtoveturin työsykli SSAB Borlängen tehtaalla vastasi hyvin erilaisia Pohjois-Amerikkalaisia testisyklejä, mutta melko huonosti eurooppalaista sykliä. Kuvassa 8 on kyseisessä työssä mitattu vaihtoveturin työsyklin teho ajan funktiona. Tämä data on koostettu kuvan 9 eri tehoportaiden osuuteen työsyklistä. Kun tätä verrataan taulukkoon 2, huomataan Pohjois-Amerikkalaisten testisykliä hyvä vastaavuus kyseiseen käyttöpaikkaan, kuten tutkimuksessa oli todettu.

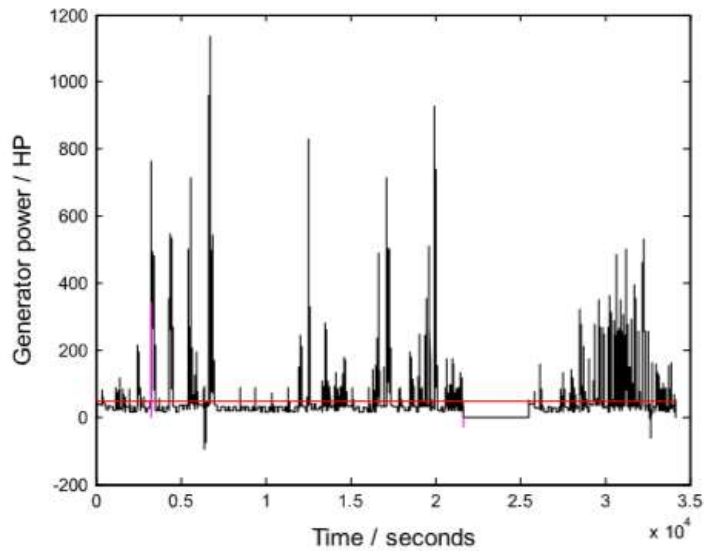


Kuva 8: Mitattu vaihtoveturin tehonkäyttö [5]

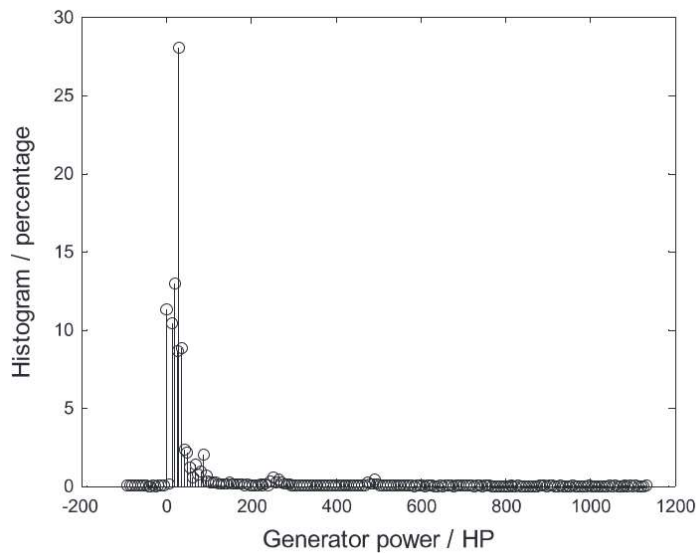


Kuva 9:Vaihtoveturin työskentelyjakson tehonkäyttö tehoportaissa [5]

Kuvassa 10 on esitetty Norfolk Southern -yhtiön vaihtoveturin tehonkäyttö 10 tunnin työskentelyjaksolla. Kyseisessä mittauksessa oli käytössä 1136 hp tehoinen diesel-sähköinen vaihtovetururi. Keskimääräinen teho tällä työskentelyjaksolla oli noin 48 hp, joka vastaa noin 4,2 % veturin huipputehosta. Tästä mittauksesta muodostettu tehojakauma (kuva 11) sopii myös hyvin taulukon 2 Pohjois-Amerikkalaisiin vaihtoveturin testisykleihin.



Kuva 10: Vaihtoveturin tehonkäyttö työskentelyjaksolla [13]



Kuva 11:Vaihtoveturin generaattoritehon prosentuaalinen osuus työjaksolla [13]

3.1.6 Päästöluokat

2021 alusta tulee voimaan uudet päästöstandardit vetureille. Tämä tiukentaa huomattavasti dieselkäyttöisten veturien päästöluokitusta, kun kaikki veturit tulevat Stage V -päästöluokan piiriin. Ennen veturit ovat olleet teholuokan mukaan Stage III A tai Stage III B -luokiteltuja. Myös työkoneet ovat 2019 alkaen siirtynet Stage V -luokkaan, joten vaihtoveturin rekisteröinti työkoneeksi tai veturiksi ei vaikuta enää päästöluokkaan. [14]

3.1.7 Vastusvoimat

Junan kulkuvastusta on tutkittu paljon ja vastusvoimien kuvaamiseksi on kehitetty monia erilaisia kaavoja, joista monet kuitenkin näyttäytyvät hyvin samantapaisina kuin alkupeäinen Davisin kaava. Myös Suomessa junan kulkuvastuksen määrittämisessä käytetään Davisin kaavaa, johon on mitattu Suomalaiselle junakalustolle sopivat kertoimet. Tämä on määritetty Liikenneviraston ratatekniset ohjeet osa 2: Radan geometria [15]. Kaavassa 6 on tämä kaava

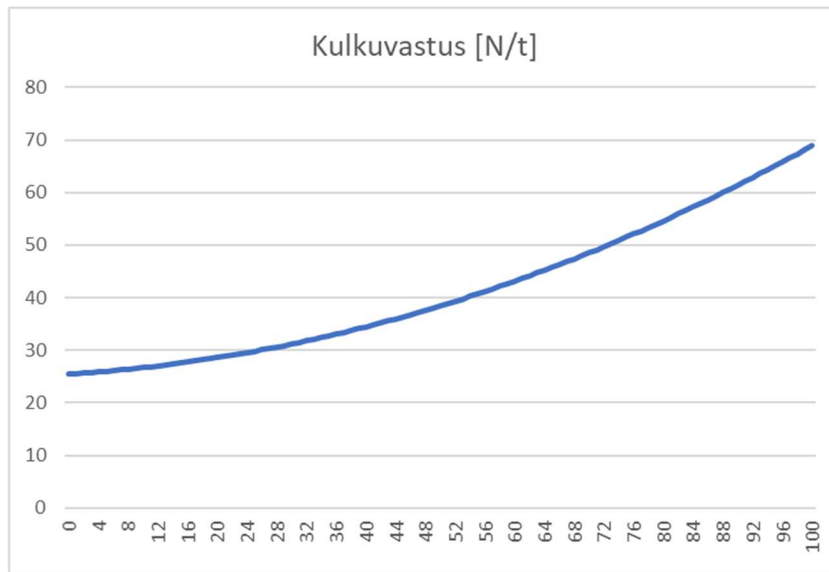
$$w = A + B * V + C * V^2, \quad (6)$$

missä w on kulkuvastus [N/kN], A on peruskulkuvastus, B on nopeudesta riippuvat vastukset ja C on ilmanvastuskerroin. Nämä ovat kalustokohtaisia, mitattuja kertoimia. V on kaavassa junan kulkunopeus [km/h]. B on hyvin pieni komponentti, joka joissain yhteyksissä saatetaan jättää huomiotta.

Suomessa käytettävät kertoimet on esitetty taulukossa 4. Kuvassa 12 on esitetty tavarajunan kertoimien avulla laskettu junatonnin kulkuvastus nopeuden funktiona.

Taulukko 4: Suomalaiset junakaluston kertoimet [15]

	A	B	C
Tavarajunat	2,55	0,0084	0,00035
Henkilöjunat	2,54	0,0060	0,00025



Kuva 12: Tavarajunatonnin kulkuvastus nopeuden funktiona

Tämä kulkuvastuksen kaava pätee vain suoralla, tasaisella radalla. Kaarteisiin ja mäkiin on määritetty omat kaavat. Suomessa käytetään kaarrevastuksen määrittämiseen kaavaa 7

$$W_R = \frac{650}{R-55}, \quad (7)$$

missä W_R on kaarrevastus [N/kN] ja R on kaarresäde. Tämä kaava toimii yleisesti kaikentyyppisille junille, ja riippuen kalustosta, voidaan käyttää jopa 20-50 % tämän kaavan arvosta.

Nousuvastuksen laskentaan voidaan käyttää radan pituuskaltevuutta s promilleina, jolloin nousuvastus $W_s = s$. Näin junan kokonaisvastus saadaan laskettua kaavalla 8

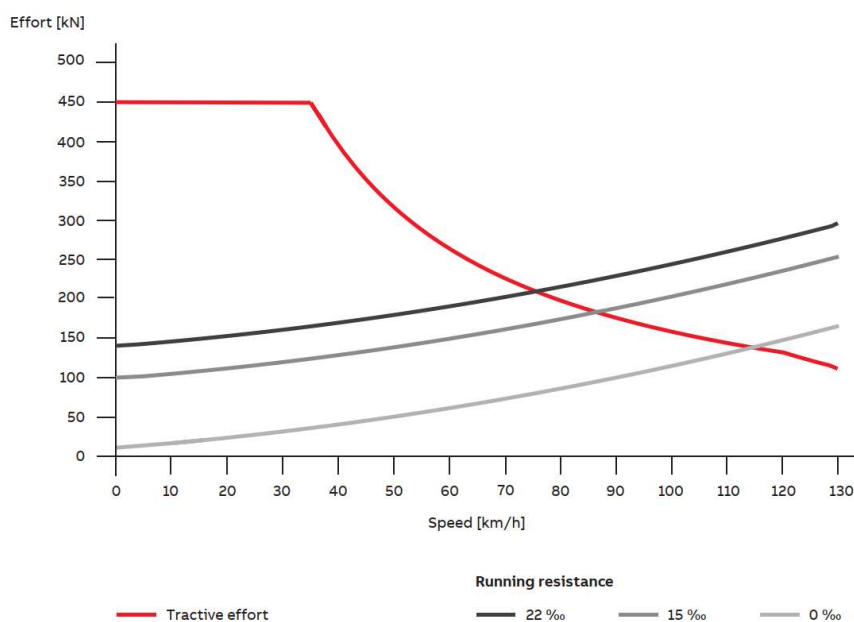
$$W_k = W + W_R + W_s, \quad (8)$$

missä W_k on junan kokonaiskulkuvastus yksikössä N/kN Jotta saadaan laskettua junan kulkuvastus, tulee tämä vielä kertoa junan massalla m [t] sekä putoamiskiihtyvyydellä g . [15]

Vaihtoveturin voimansiirto mitoitetaan tässä tapauksessa veturin massasta laskettavaa kitkavoimaa vasten, eikä junan vastusta vastaan. Vaikka junan vastusvoimia ei huomioida tässä työssä voimansiirron tai voimanlähteen mitoituksessa tai arvioinnissa, tulee tässä huomioida vastusvoimien luonne. Esimerkiksi kulkuvastus suoralla radalla on hyvin riippuvainen nopeudesta. Näitä tietoja voidaan käyttää hahmottelemaan valittavaa veturia, kun käyttökohteen radan geometria sekä vedettävän junan massa on tiedossa. Teräspyörällä on yleisesti käytetty 50 N/t vastusta veturin mitoituksessa, mikäli tarkempia tietoja radan geometriasta ja vedettävästä kalustosta ei ole saatavilla.

Kuvassa 13 on esimerkki ABB:n rautatie-esitteestä vetovoiman ja kulkuvastuksien käyttämisestä junan huippunopeuden määrittämisessä. Punainen käyrä esittää veturin veto-voimaa ja harmaat sekä musta vastusvoimaa eri radan nousuilla. Vaalein harmaa esittää jonkin painoisen junan kulkuvastusta tasaisella radalla. Riippuen radan noususta, junan huippunopeus voidaan lukea punaisen ja harmaan käyrän leikkauskohdasta. Esimerkiksi tasaisella radalla kyseinen esimerkkiveturi jaksaisi vetää junaa noin 115 km/h nopeudella, kun taas 22 ‰ nousussa huippunopeus tippuu noin 75 kilometriin tunnissa.

Traction diagram



Kuva 13: Veturin vetovoimakuvaaajan ja junan vastusvoimien vertailu [16]

3.1.8 Junan välykset

Junissa erityispiirteenä sekä ominaisuutena on vaunujen suuri määrä ja erot niiden välillä. Samassa junassa voi olla erityyppisiä ja eri-ikäisiä vaunuja jopa useita kymmeniä, joten junan kokonaisuus voi vaihdella hyvin paljon.

Vaunujen kytkennässä käytetään Suomessa ruuvikytkimiä tai keskuspuskimia. Näistä ruuvikytkimet voidaan kiristää välyksettömiksi, joka tosin tapahtuu manuaalisesti. Mikäli junassa on välyksiä vaunujen välillä, voivat niin sanotut puskinvoimat kasvaa hyvin suureksi erityisesti vaihdettaessa vedolta jarrutukselle.

Välyksiä voidaan toisaalta käyttää hyväksi liikkeellelähdössä, jossa kuljettaja voi ”pakata” junan eli peruuttaa veturilla junan kasaan ja lähteä vasta sitten liikkeelle. Näin veturi

nykäisee ensimmäisen vaunun liikkeelle ja jokainen vaunu vuorollaan nykäisee seuraavan liikkeelle. Näin syntyy ketjureaktio, joka helpottaa vaunujen liikkeellelähtöä ja veturilla voidaan saada liikkeelle painavampi juna kuin suoraan vetämällä.

3.1.9 Ulottuma

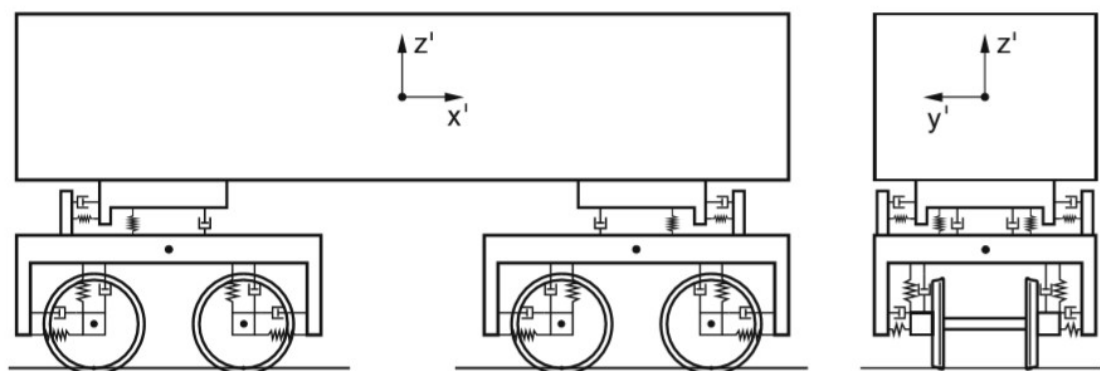
Junille on määritetty liikkuvan kaluston ulottuma, jonka sisällä junan tulee liikkua. Tämä on määritelty standardissa SFS-EN 15273-2:2013+A1:2016 liitteessä F. Ulottuma on erikseen määritetty suoralle raiteelle ja kaarteeseen. Myös vaihtoveturin tulee pysyä tämän ulottuman sisäpuolella.

3.2 Systemin analysointi

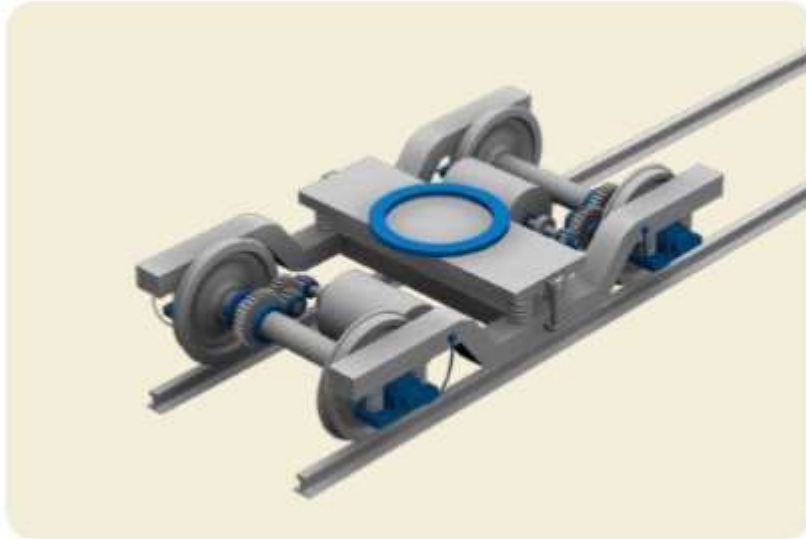
3.2.1 Tyypillinen veturin rakenne

Tyypillinen nykyaikainen veturi on rakennettu telialustalle. Telejä on vetureissa yleensä kaksi ja näissä on kaksi tai kolme akselia riippuen veturin massasta ja akselipainosta. 75 % uusista vetureista on rakennettu kahdella telillä, joissa on kaksi akselia [17].

Kuvassa 14 on esitetty kahden telin ja neljän akselin veturin jousituksen periaatekuva. Kuvasta on nähtävissä joustosuunnat sekä telien ja veturin rungon välillä että akselien ja telien välillä. Akselin ja telin välistä jousitusta kutsutaan ensiojousitukseksi. Rungon ja telin välistä jousitusta taas toisiojousitukseksi. Molempiin on hyvin monia toteutustapoja. Kuvassa 15 on esimerkki vetureissa käytettävästä kaksiakselisesta telistä, jossa on ajomootorit molemmilla akseleilla.



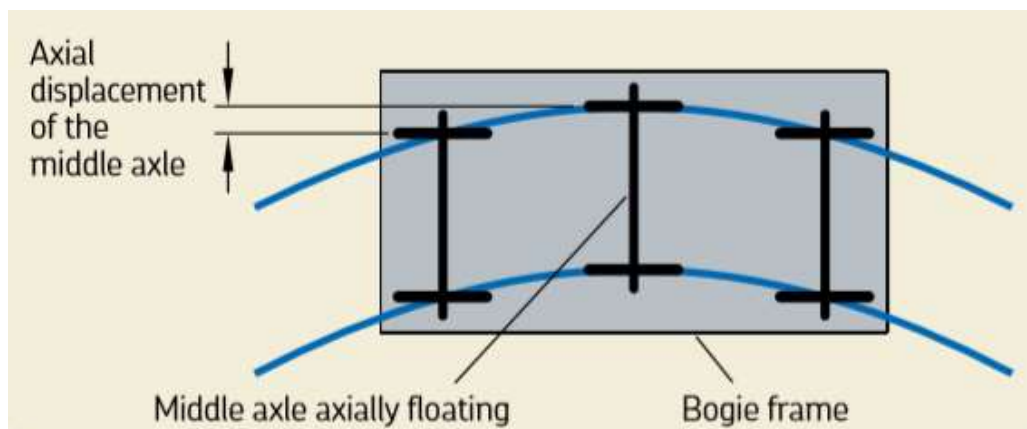
Kuva 14: Telialustaisen veturin periaatekuva [18]



Kuva 15: Veturin teli [17]

Joissain tapauksissa, kuten ratatyökoneissa ja vaihtovetureissa ei käytetä telejä, vaan akselit jousitetaan suoraan suhteessa runkoon. Esimerkiksi OTSO-robot sekä Suomessa käytössä olevat Tka-sarjan ratatyökoneet ovat rakennettu tällä tavalla.

Tällainen rakenne edellyttää kuitenkin pienehköä massa, jottei akselipaino kasva liian suureksi. Lisäksi kolmen akselin alustalla keskimmäisen akselin on päästävä joustamaan sivuttaissuunnassa kaarteissa ja vaihteissa (kuva 16). Sivuttainen liike edellyttää oikeantyyppistä kiinnitystapaa, jolloin laakerit pääsevät liikkumaan suhteessa runkoon tai akseli liikkuu laakeroinnissaan. [17]

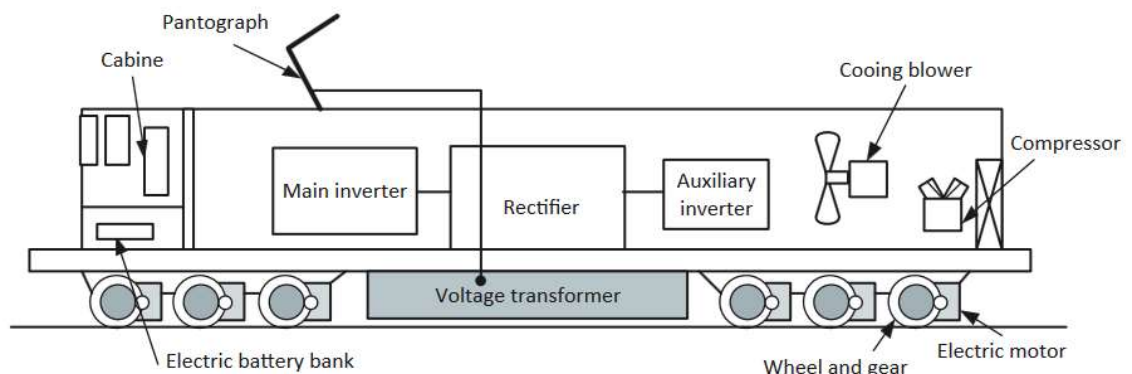


Kuva 16: Kolmiakselinen teli kaarteessa [17]

Suoraan runkoon jousitettu akseli on kuitenkin yksinkertainen ja edullinen ratkaisu, kun teli jää pois veturin rakenteesta. Jousitus on helposti toteutettavissa esimerkiksi Chevron-kumijousituksella.

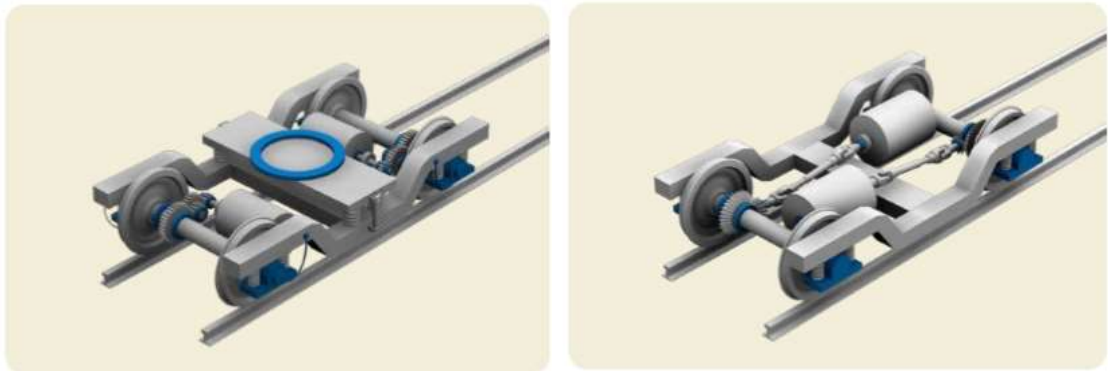
3.2.2 Sähköveturi

Sähkökäyttöisellä veturilla tarkoitetaan tässä veturia, joka saa energiansa kiskojen yläpuolella kulkevasta ajolangasta tai kiskojen vierellä kulkevasta virtakiskosta. Tästä sähkö johdetaan veturin ajomoottoreille, joilla tuotetaan veturin vetovoima. Tällaisia ovat esimerkiksi Suomessa käytettävät Sr2- ja Sr3-veturit. Uusimmat sähköveturit pystyvät myös regeneroimaan jarrutusenergiaa syöttämällä sähköä takaisin ajolankaan [19]. Kuvassa 17 on esitetty sähköveturin pääkomponentit.



Kuva 17: Sähköveturin pääkomponentit [20]

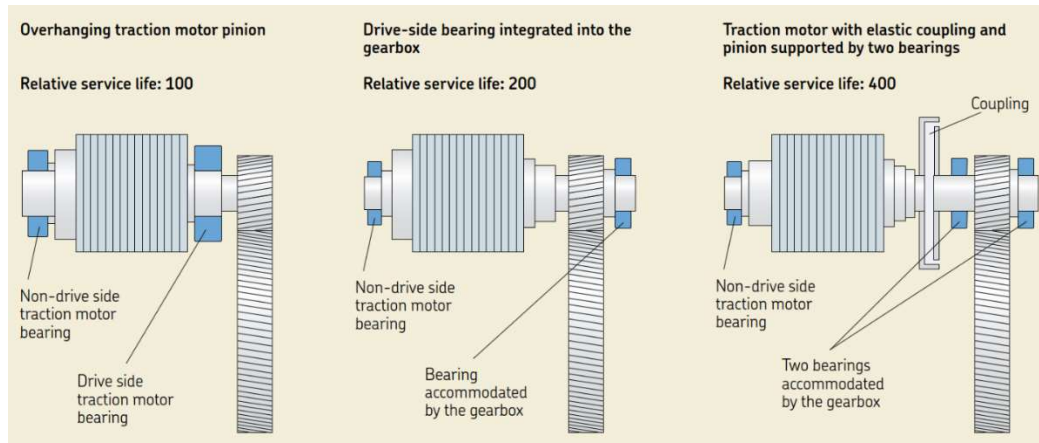
Sähkömoottorit ovat yleensä sijoitettu teliin seuraavien kuvan 18 vaihtoehtojen mukaisesti. Näistä akselin suuntainen, vasemmanpuoleisen vaihtoehdon mukainen on yleisempi ratkaisu vetureissa. Oikeanpuoleinen on yleisemmin käytössä esimerkiksi raitiovaunuissa, joissa moottori ja vaihde on saatava mahtumaan hyvin pieneen tilaan.



Kuva 18: Sähkömoottorien asettelu telissä [17]

Akselin suuntaisia moottorien asennustapoja on hyvin monia. Hitaasti kulkevissa tavaravetureissa moottori on tyypillisesti kiinteästi akselissa kiinni, kun taas henkilöjunissa käytettävissä moottori on jousitettu suhteessa akseliin. Kiskoista aiheutuu akseliin hyvin suuria, iskumaisia voimia, jotka voivat kasvaa hyvin suuriksi nopeuden noustessa ja tämän takia suuremmilla nopeuksilla ei käytetä kiinteää ratkaisua. Iskumaiset kuormitukset

myös lyhentävät moottorin kestoikää, joka näkyy muun muassa SKF:n suunnitteluohjeen huoltovälin mitoituksen nelinkertaistumisena (kuva 19). [21]

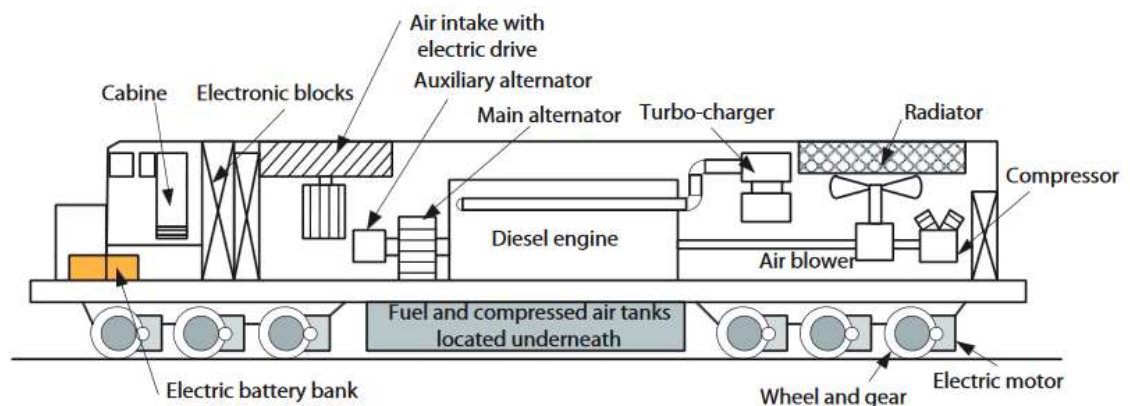


Kuva 19: SKF huoltovälin mitoitus eri moottorin kytkennöillä [21]

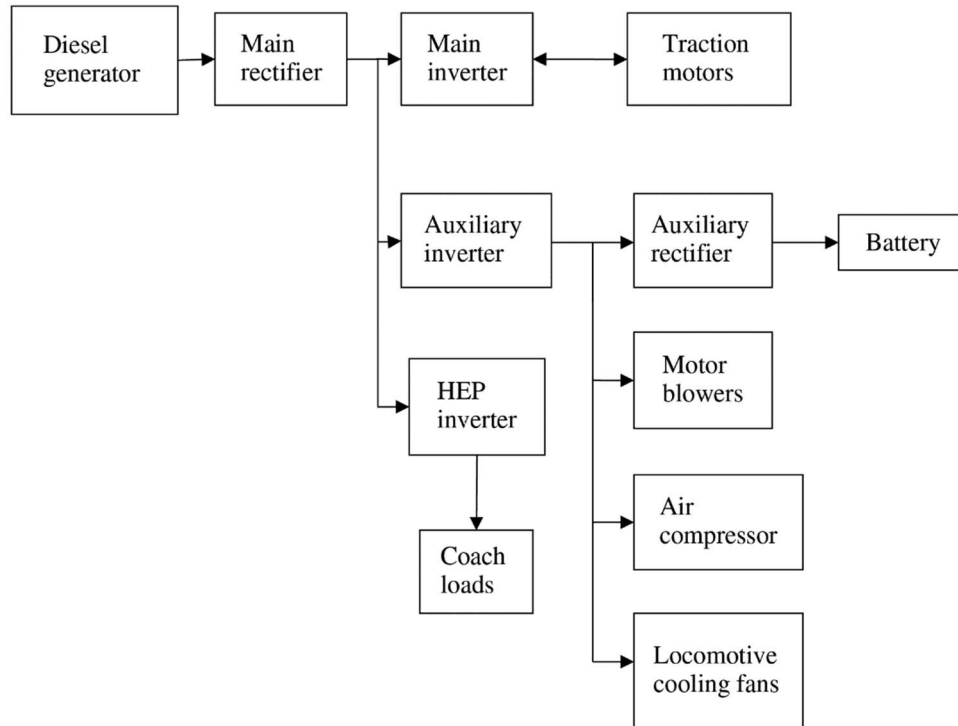
3.2.3 Diesel-sähköinen veturi

Diesel-sähköisessä veturissa ajomoottorien toteutus on vastaava kuin sähköveturissa. Sähköenergia kuitenkin tuotetaan polttomoottorilla ja generaattorilla, josta sähköenergia johdetaan ajomoottoreille. Diesel-sähköinen on nykyisin maailmanlaajuisesti yleisin tapa toteuttaa dieselveturin voimansiirto [19]. Suomessa käytettävistä vetureista esimerkiksi Fenniarailin Dr18-veturit sekä VR:n uudet, Stadlerilta tilatut veturit ovat toteutettu tämän-tyyppisellä voimansiirrolla [10], [22].

Kuvassa 20 on esitetty diesel-sähköisen veturin pääkomponentit. Kuvassa 21 on esitetty diesel-sähköisen veturin voimansiirron energian kulku eri komponenttien välillä. Tyypillisiä diesel-sähköisen veturin pääkomponenttien hyötysuhdearvoja on esitetty taulukossa 5.



Kuva 20: Diesel-sähköisen veturin pääkomponentit [20]



Kuva 21: Energian kulku diesel-sähköisessä veturissa [23]

Taulukko 5: Diesel-sähköisen veturin eri komponenttien hyötysuhteet [5]

Diesel engine	25-40 % in locomotives (where 40 % is the peak efficiency of new locomotive engines)
Generator	90-93 %
Traction motors	90-93 %
Transmission	98.5-99 % [3]
Total efficiency is typically	20-25 %

Diesel-sähköinen voimansiirto mahdollistaa kuitenkin polttomoottorin käyttämisen parhaalla hyötysuhteella kullekin tehoportalle. Dieselmoottorin hyötysuhde on melko huono, jolloin kuormittamalla moottoria oikein, voidaan saavuttaa huomattaviakin polttoainesäästöjä. Sähkökomponenttien hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin dieselmoottorin, joten sähkökomponenttien hyötysuhteen laskun kustannuksella dieselmoottoria kannattaa ajaa hyvällä hyötysuhteella, jolloin kokonaishyötysuhde saadaan maksimoitua.

Vaihtoehtoisesti diesel-sähköinen toteutus voitaisiin toteuttaa käyttämällä dieselmoottoria vakiokierroksilla ja säätää tehoa pelkästään kuormitusta muuttamalla. Tätä ohjausta käytetään esimerkiksi laivoissa, joissa on myös polttomoottori-sähkö -tyyppinen voimansiirto.

3.2.4 Hydrodynaaminen voimansiirto

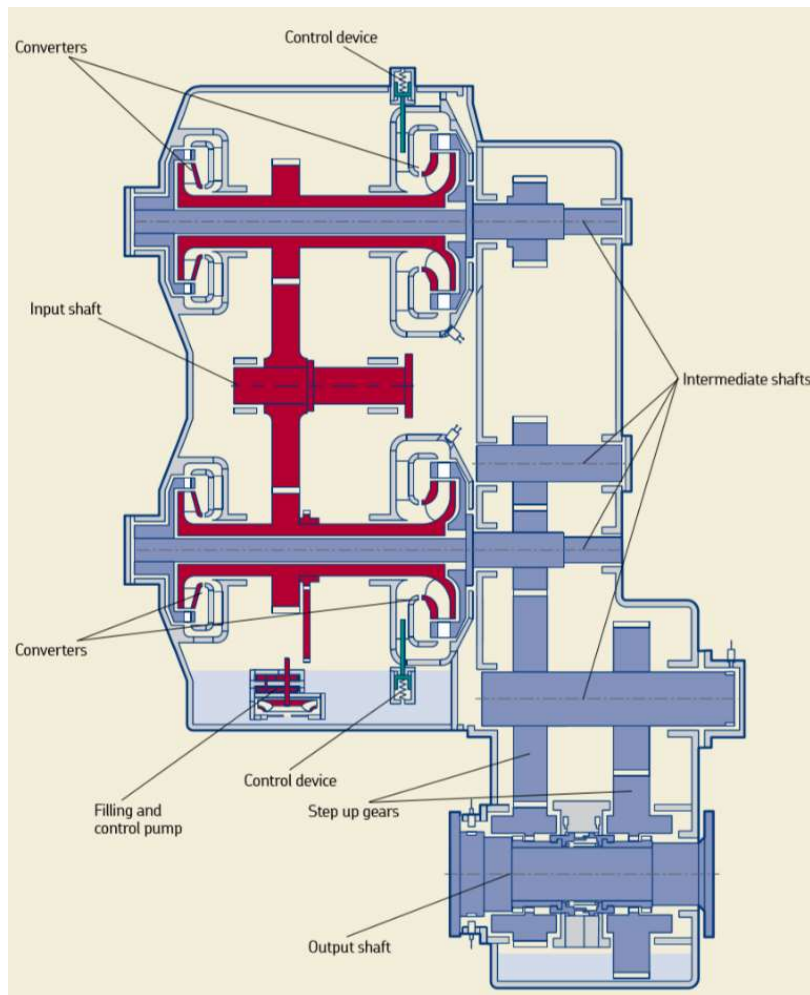
Hydrodynaamisella voimansiirrolla tarkoitetaan voimansiirtoa, jonka vaihteistossa voima välitetään nesteen kautta. Rautatieympäristössä tämä tarkoittaa käytännössä momentinmuunninta tai hydraulista kytkintä. Tämä on sähköön lisäksi toinen tyypillisistä tavoista toteuttaa dieselveurin voimansiirto.

Momentinmuuntimen ja hydraulisen kytkimen toiminta perustuu öljyn linkoamiseen siipipyörien välillä ja energia välittyy lopulta öljyn liike-energian ja suuren virtausmäärän kautta alhaisella paineella. Tästä juontuu nimitys hydrodynaaminen. Tällaisessa vaihteistossa kaikki momentti siirretään öljyn välityksellä, eikä akselien välillä ole mekaanista kontaktia, kuten esimerkiksi levykytkintä.

Hydrodynaamisen vaihteiston hyötysuhde riippuu hyvin paljon luistosta, jolloin energiaa menee hukkaan tuotettuna lämpönä. Toisaalta dieselmoottorin tuottama pulssimainen voima ei välity öljyn läpi ja tätä kautta voimansiirron ja vaihteiston käyttöikä on hyvin pitkä.

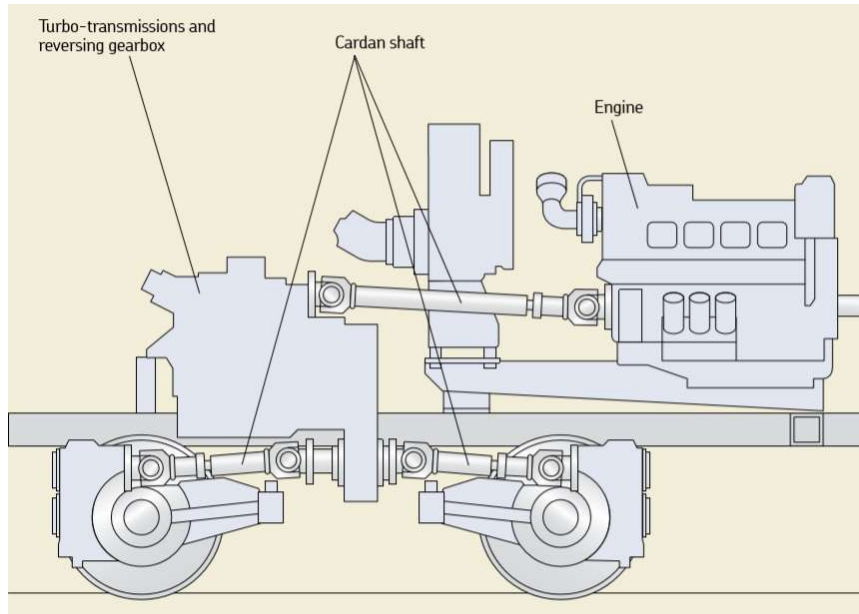
Jokaiselle vaihteelle on tällaisessa vaihteistossa oma momentinmuunnin tai hydraulinen kytkin ja vaihteiston luistoa voidaan säätää momentinmuuntimen täyttöasteella. Vaihteita on usein kaksi molempiin ajosuuntiin.

Kuvassa 22 on Voith Turbo -vaihteiston poikkileikkaus, jossa näkyy yhteensä neljä momentinmuunninta. Vaihteistossa on kaksi vaihdetta molempiin ajosuuntiin ja kullekin oma momentinmuunnin. Näin toteutetussa vaihteistossa ei tarvita mekaanisia kytkimiä vaihteiden tai ajosuunnan muuttamiseksi, vaan tämä voidaan tehdä täysin momentinmuuntimien öljymäärää muuttamalla. Tällöin käytettävän vaihteen momentinmuunnin tai hydraulinen kytkin on ainoa, missä on öljyä loppujen pyöriessä tyhjänä.



Kuva 22: Voith Turbo -vaihteiston periaatekuva [21]

Hydrodynaamisessa voimansiirrossa dieselmoottorin tuottama momentti välitetään yleensä kardaaniakselilla vaihteistolle. Vaihteistolta momentti välitetään kardaaneilla akselinkäyttölaitteille, joilla momentti käännetään akselin suuntaiseksi. Akselinkäyttölaitteita on yksi- tai kaksiporaisia. Yksiportaisilla välityssuhde on noin 1:4–1:5 ja kaksiporaisilla noin 1:7-1:10. Kuvassa 23 on esitetty tyypillinen veturin hydrodynaaminen voimansiirto ja sen pääkomponentit.



Kuva 23: Tyypillinen diesel-hydrodynaaminen voimansiirto [21]

Hydrodynaaminen voimansiirto asettaa veturin suunnitteluun tiettyjä rajoituksia, kun voima välitetään kardaniakseleilla eri komponenttien välillä. Kardaniakselien käyttö aiheuttaa muun muassa sen, että teleille tulevien kardaniakselin täytyy olla melko pitkät, jotta telien kääntyessä kardaniakselien murrosnivelen kulma ei kasva liian suureksi. Tämä taas edellyttää vaihteiston asentamista suhteellisen keskelle veturia. Ilman telejä toteutetussa veturissa tämä ei ole niin merkittävää, sillä akselit pysyvät lähes samansuuntaisina koko ajan.

3.2.5 Hydrostaattinen voimansiirto

Hydrostaattisessa voimansiirrossa veturin voimansiirto perustuu öljyn paineeseen. Tässä hydraulipumppu tuottaa öljynpainetta, joka muutetaan mekaaniseksi pyörimisliikkeeksi hydraulimootorilla. Täysin hydrostaattinen voimansiirto on harvinainen veturikäytössä, mutta pienille ajonopeuksille ja tehoalueilla se on helppo ratkaisu.

Hydrostaattinen ajovoimansiirto on tyypillisesti työkoneissa toteutettu suljetun kierron hydraulikkapiirillä. Tämä tarkoittaa suljettua kiertoa, jossa pääosin sama öljy kiertää piirissä. Hydraulikkaöljyn kiertosuuntaa vaihtamalla voidaan vaihtaa ajomoottorien kiertosuunta.

Mekaanisesti hydrostaattinen voimansiirto on huomattavasti vapaamuotoisempi toteuttaa kuin hydrodynaaminen. Hydraulikkaletkut ja -putket ovat helpommin muotoiltavissa kuin kardaniakselit. Lisäksi hydrostaattinen voimansiirto voidaan toteuttaa fyysisesti pienemmillä komponenteilla, kuin esimerkiksi hydrodynaaminen.

Hydrostaattista voimansiirtoa käytetään joissain tapauksissa hydrodynaamisen voimansiirron yhteydessä erillisellä vaihteistolla. Tämä toteutetaan yleensä asentamalla kahden kardaaaniakselin väliin hydrostaattista ajoa varten oma vaihteisto, jonka avulla voidaan pyörittää kardaaaniakseleita hydraulimoottorilla. Normaalissa ajossa vaihteisto toimii kardaaaniakselin kannatinlaakerin tavoin kahden kardaaaniakselin välissä.

Erillistä hydrostaattisen ajon vaihteistoa käytetään melko yleisesti ratatyökoneissa, joissa on hyötyä hyvistä hidasajo-ominaisuuksista sekä tarkasta paikoittamisesta. Hydraulista ajoa voidaan käyttää esimerkiksi huoltotoissa työskenneltäessä henkilönostimella ja on tarve siirtyä lyhyitä matkoja huoltokohteelta toiselle hiljaisella nopeudella.

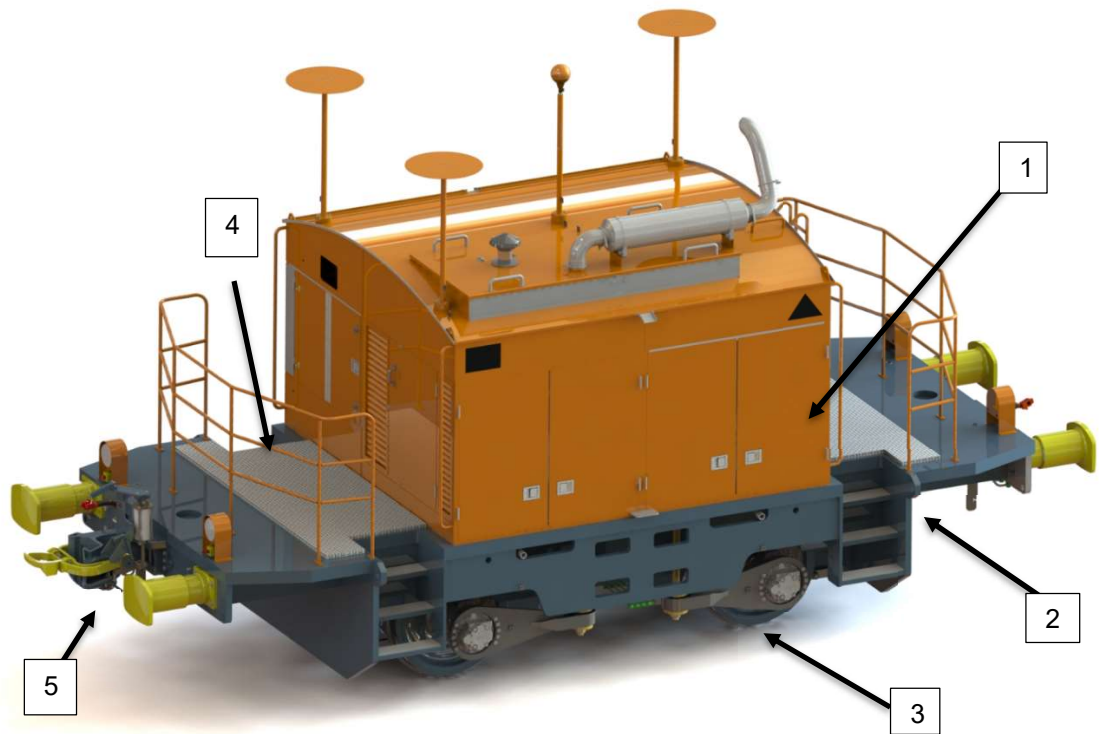
3.3 Arkkitehtuurin mallinnus

Tämä diplomityö pohjautuu valmiiseen tuotteeseen, joten tässä luvussa on esitelty kyseisen vaihtoveturin rakenne. Tämä helpottaa seuraavassa vaiheessa tehtävää mallinnusta sekä eri voimansiirtokonseptien kehittämistä.

OTSO-robot mallisto pohjautuu kaksi- ja kolmeakselisiin veturin runkoihin. Malleista 50 ja 100 pohjautuvat kaksiakseliseen runkoon ja 75 sekä 150 kolmiakseliseen runkoon. 100 ja 150 malleissa on kaksi, kaksi- tai kolmiakselista runkoa, jotka ovat nivelellä kiinni toisissaan. Kaikissa maksimi akselipaino on 25 t, joka on monissa kohteissa suurin sallittu.

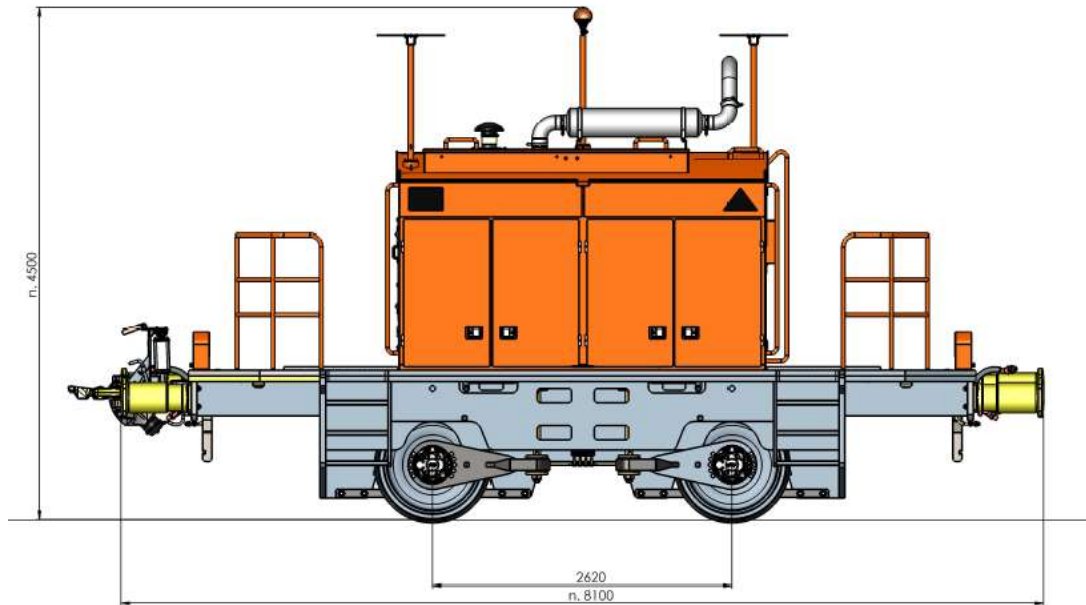
Veturin pääkomponentit ovat merkitty kuvaan 24, jossa on kaksiakselinen OTSO-robot 50. Kuvassa numero 1 on konesuoja, jonka sisällä on suurin osa veturin tekniikasta, kuten dieselmoottori, polttoainesäiliö sekä hydraulipumput. Numero 2 on veturin runko, joka on hitsattua levyrakennetta. Numero 3 on pyöräkerta, johon sisältyy akseli, kiskopyörät, hydraulimoottorit, laakerit sekä jarrut. Numero 4 on kulkusilta, josta on kulku konesuojan sisälle.

Numero 5 on veturin molemmissa päissä olevat puskin- ja vetolaitteet. Puskimet ovat veturin reunoilla olevat, kuvassa keltaiset jousitetut laitteet, joilla työnnetään vaunuja niiden vastaavia puskimia vasten. Nuolen kärjen kohdalla on Teräspyörän valmistama Vapiti-kytkin, jolla vedetään vaunuja. Vapiti-kytkimessä on yhdistettynä suomalainen ruuvikytkin sekä venäläinen SA-3 keskuspuskin ja jota voidaan käyttää etänä. OTSO-robotia valmistetaan myös tavallisella ruuvikytkimellä tai SA-3 keskuspuskimella.

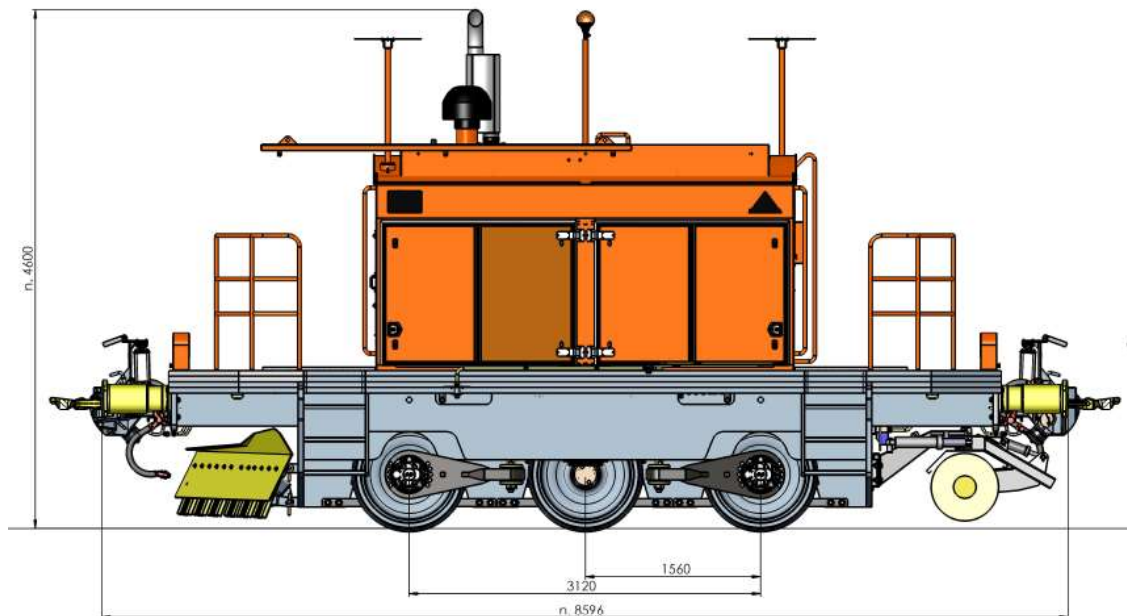


Kuva 24: OTSO-Robot 50 yleiskuva

Kuvissa 25 ja 26 on näkyvissä 2- ja 3-akseliset veturin peruskonstruktiot. Päämitoiltaan ja ulkoasultaan ne ovat melko yhtenevät. Merkittävin ero tulee kuitenkin akselien välimatkoista, joka on 3-akselisessa huomattavasti lyhyempi. Kuvan 26 kolmiakselisessa veturissa on esimerkkinä veturiin kiinnitettäviä lisälaitteita, vasemmalla kiskoraivain ja oikealla hydraulikäyttöinen harja.

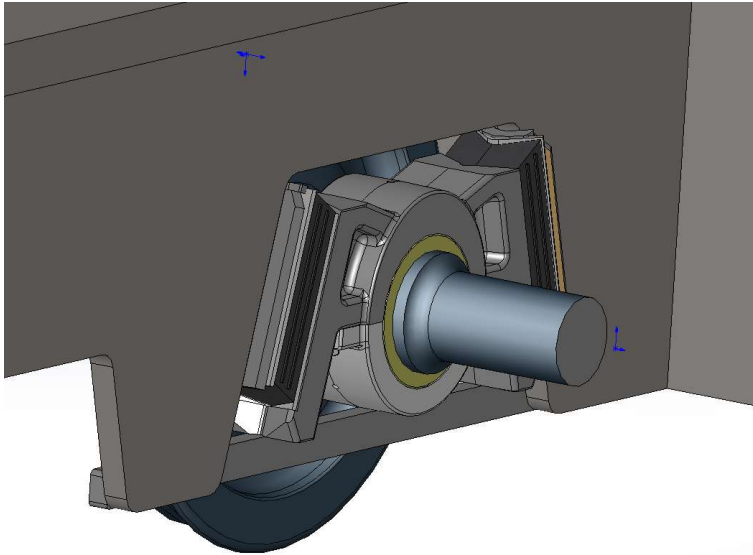


Kuva 25: OTSO-robot 50 päämittakuva



Kuva 26: OTSO-robot 75 päämittakuva

Veturin akselit tukeutuvat runkoon Chevron- tyyppisillä kumijousilla, jotka ovat alaspäin aukeavissa V-hahloissa (kuva 27). Tämän tyyppisessä jousituksessa akselit paikoittuvat kumijousien väliin hahloihin painovoimaisesti, ja vain ulosjouto on rajoitettu, jottei akseli ”hyppää” pois kolostaan. Tämä on junissa melko yleinen jousitusratkaisu telien ja akselien välillä. [11, p. 67]



Kuva 27: OTSO-robotin jousitus

Veturin rakenne on käytössä todettu hyväksi, ja se pyritään säilyttämään mahdollisimman pitkälle. OTSO-robotin eri mallien tekniset tiedot ovat eritelty taulukossa 6. Taulukosta on nähtävissä suuntaa antavasti eri versioiden maksimivetovoiman ja -tehon suhde painoon. Liitteessä A on näkyvissä eri mallien mittakuvat sekä konseptit.

Taulukko 6: OTSO-robot -mallisto [6]

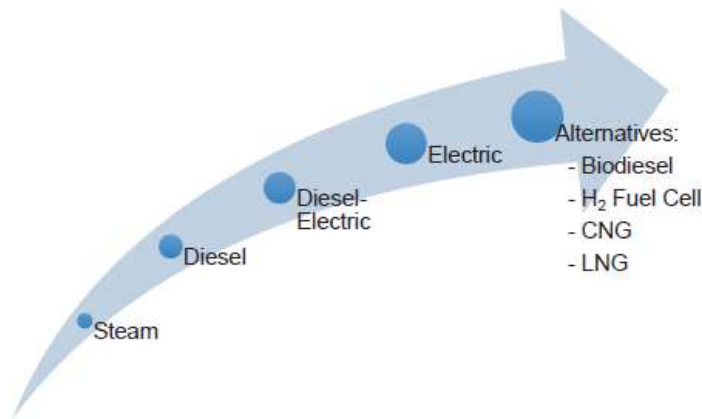
Tekniset tiedot Malli	OTSO-robot			
	50	75	100	150
Paino	30–50 t	60–75 t	80–100 t	120–150 t
Max. vetovoima	135 kN	200 kN	270 kN	400 kN
Max. nopeus	15 km/h	15 km/h	15 km/h	15 km/h
Moottoriteho	n. 150 kW	n. 200 kW	n. 330 kW	n. 400 kW
Voimansiirto	Hydrostaattinen			

3.4 Ylätason suunnittelu (Energianlähteet)

3.4.1 Energianlähteet

Suomessa on käytössä sähköllä tai dieselillä toimivia vetureita. Vuonna 2018 Suomessa oli dieselvetureita 217 ja sähkövetureita 173 [24]. Vaihtoveturit ovat monesti dieselillä toimivia, koska ratapihoja ei ole kannattavaa sähköistää.

Tämä luku on kirjallisuuskatsaus vetureissa käytettyihin energialähteisiin. Lisäksi pohditaan, miten ne sopisivat vaihtoveturin energialähteeksi. Kuva 28 esittää vetureissa käytettyjen energianlähteiden tai polttoaineiden kehitystä ajan myötä.



Kuva 28: Veturissa käytettyjen polttoaineiden historia [20, p. 63]

3.4.2 Dieselmoottori

Dieselmoottori on hyvin perinteinen ja nykyisin sähkön ohella toinen vetureissa yleisesti käytettävistä energianlähteistä. Dieselmoottori on hyvin monipuolinen voimanlähde ja polttoainetta on saatavilla hyvin laajalti.

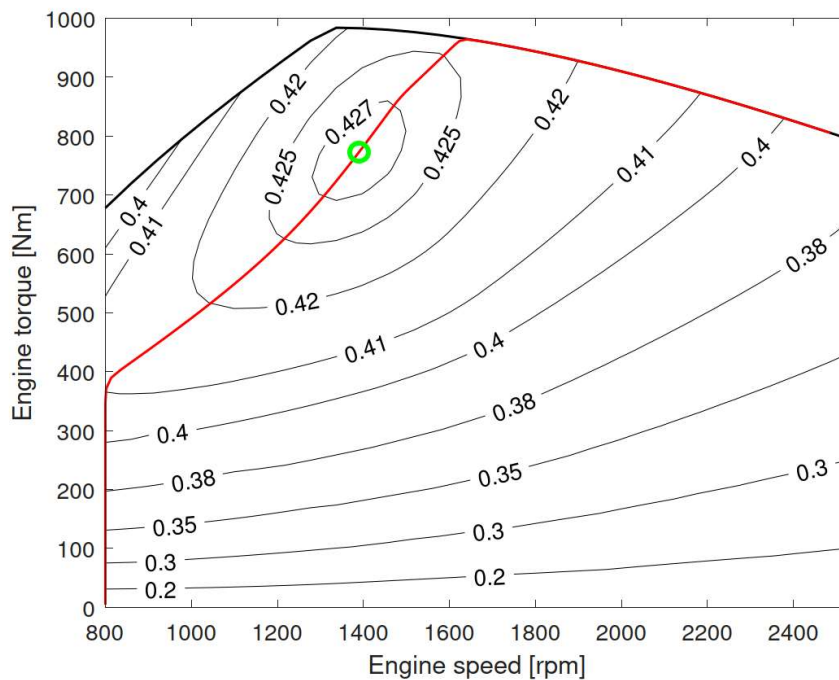
Vaihtoveturin voimanlähteeksi dieselmoottori on hyvin soveltuva. Se on luotettava, tehokas ja helposti integroitavissa lähes mille tahansa käyttöpaikalle tai tehtaalle. Dieselin saatavuus ja tankkausnopeus ovat erinomaisia, eikä polttoaineen saanti aiheuta käytännössä rajoituksia veturin käyttöön. Hyvin monilla tehtailla työkoneet ovat dieselkäyttöisiä, joten pääsääntöisesti alueella on polttoaineen jakelupiste.

Tavallinen diesel on kuitenkin fossiilista polttoainetta, joka aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Dieselmoottorin päästöjä voitaisiin helposti leikata huomattavasti käyttämällä uusiutuvaa tai kierrätysraaka-aineista tehtyä dieseliä. Tämä pystyttäisiin toteuttamaan ilman teknisiä muutoksia konekantaan. Toisaalta tämän litrahinta on korkeampi ja saatavuus huonompi kuin perinteisen dieselin.

Dieselmoottorin hyötysuhde on yleisesti melko huono ja on hyvin riippuvainen moottorin kuormituksesta. Moottorista ja sen kuormituksesta riippuen dieselmoottorilla päästään yleisesti vain noin 25-40 % hyötysuhteeseen. Kuvassa 29 on esitetty niin sanottu simpukkakuvaaja dieselmoottorin hyötysuhteesta moottorin kierrosnopeuden (vaaka-akseli) ja kuormitettavan väännön suhteen (pystyakseli). Musta viiva on moottorin maksimivääntökäyrä kierrosnopeuden funktiona ja sen alapuolelle jää osakuormituksella toimiva alue. Simpukkakuvaajan kolmiulotteiset ”korkeuskäyrät” merkitsevät moottorin eri hyötysuhteen alueita.

Kuvan 29 punainen käyrä esittää parhaan hyötysuhteen käyrää. Tämä kuvaa, millä kuormalla moottoria kannattaisi kuormittaa kullakin kierrosnopeudella parhaan hyötysuhteen

saavuttamiseksi. Vihreä ympyrä on moottorilla saavutettava yksittäinen parhaan hyötysuhteen piste.



Kuva 29: Erään dieselmoottorin hyötysuhdekartta [25]

Koska moottorin tuottama teho on kaavan 9 mukaisesti riippuvainen moottorin kierrosnopeuden n [1/s] ja momentin M [Nm] tulosta, voidaan moottorilla tuottaa sama teho eri kierroksilla muuttamalla moottorin kuormitusta eli ulos otettavaa vääntöä.

$$P = 2\pi nM \quad (9)$$

Oletetaan, että kyseinen moottori tuottaa huipputehon kierrosluvulla 2500 rpm. Kyseisellä kierrosluvulla moottorin vääntömomentti on noin 800 Nm, joten maksimiteho voidaan määrittää seuraavasti kaavalla 10:

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2500 \cdot 800}{60} = 209\,439\,W, \quad (10)$$

joka voidaan tässä pyöristää 210 kW. Veturien tehoportaot määritetään standardien mukaisesti prosentteina huipputehosta. Tutkitaan esimerkiksi 50 % tehoa huipputehosta, joka vastaa noin tehoporrasta 5. Tämä tarkoittaa 210 kW tehoisella moottorilla 105 kW tehoa, joka voidaan tuottaa kuormittamalla moottoria kaavan 11 mukaisesti

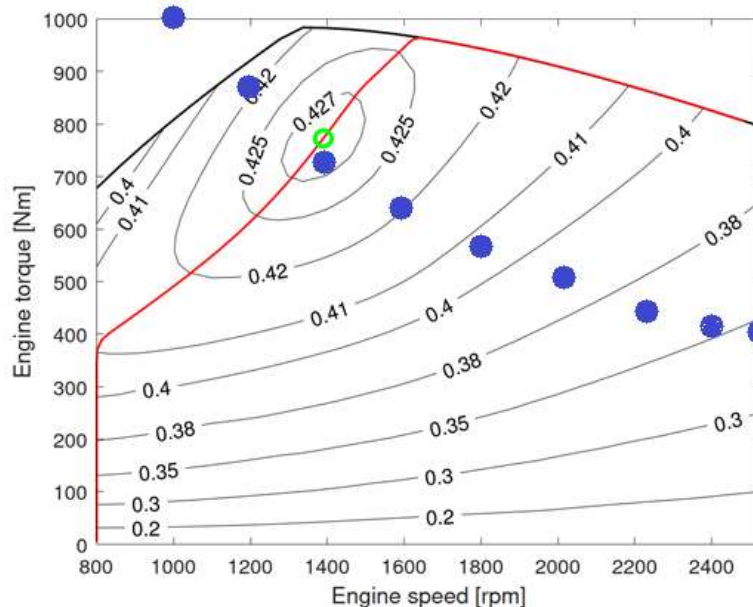
$$M = \frac{105\,000}{2\pi n}, \quad (11)$$

missä M kertoo kullakin pyörimisnopeudella n , millä momentilla moottoria tulisi kuormittaa, jotta saavutetaan haluttu teho. Eri pyörimisnopeuksilla lasketut momentit on esitetty seuraavassa taulukossa 7.

Taulukko 7: 50 % maksimitehosta tuottaminen eri kierrosluvuilla

N [rpm]	M [Nm]
800	1253
1000	1003
1200	836
1400	716
1600	627
1800	557
2000	501
2200	456
2400	418
2500	401

Kun tämän kaavan avulla lasketut kuormituspisteet (kuvan 30 siniset pisteet) asetetaan hyötysuhdekarttaan, voidaan hyvin helposti huomata, että tämä tehoporras kannattaisi toteuttaa, jos mahdollista, noin 1400 rpm moottorin kierrosluvulla ja noin 700 Nm väännöllä. Sama prosessi pitäisi toteuttaa kaikille tehoportaille ja mikäli mahdollista, ottaa mukaan myös muut voimalinjan komponentit, joilla pystytään vaikuttamaan tähän, esimerkiksi generaattori. Toisaalta dieselmoottori on hyvin monesti voimalinjan hyötysuhteeltaan heikoin komponentti, jolloin sen kuormituksen optimoinnilla saavutettavat hyödyt ovat suurimmat.

**Kuva 30: Saman tehon tuottaminen eri hyötysuhteilla ja kierrosluvulla, muokattu [25]**

Dieselmoottorin ollessa hyvin yleinen voimanlähde työkoneissa ja kuorma-autoissa, voidaan moottori valita laajasta valikoimasta moottoreita asiakkaan toiveiden mukaiseksi. Valinnassa vaihtoveturiin vaikuttaa tehon tarpeen lisäksi esimerkiksi eri valmistajien

huoltoverkosto asiakaskohteessa tai muu asiakkaalla käytössä oleva työkonelusto. Vaihtoveturin teholuokassa käytettävät dieselmoottorit ovat olleet hyvin vastaavia kuin työkoneissa ja kuorma-autoissa, joten asiakkaalle voi olla kannattavaa valita esimerkiksi Volvon moottori veturiin, mikäli heillä on käytössä esimerkiksi Volvon kauhakuormaajia tai kuorma-autoja. Näin huolto-osat ja huolto voidaan tilata samasta paikasta. Parhaassa tapauksessa osat käyvät ristiin eri koneisiin.

Vaihtoveturikäytössä tehon tarve on hyvin jaksottaista ja dieselmoottori joudutaan mitoittamaan vetovoiman mahdollistaman suurimman tehopiikin mukaiseksi. Työsyklistä hyvin suuri osa on kuitenkin tyhjäkäyntiä tai muuten matalan tehontarpeen käyttöä, jolloin dieselmoottori toimii hyötysuhteeltaan huonoimmalla alueella (kuva 9).

3.4.3 Kaasumoottori

Suomessa ei ole yleisesti käytetty kaasumoottoreita vetureissa, mutta sellainen olisi melko pienillä muutoksilla veturiin mahdollista ottaa käyttöön. Tämä muutos vaatisi moottorin ja polttoainejärjestelmän uusimisen. Kaasumoottorit esimerkiksi Scanialla pohjautuvat samaan perusmoottoriin kuin dieselmoottorit, joten uuteen moottoriin vaihtaminen olisi hyvin yksinkertaista. Kuten dieselille, myös kaasulle olisi tarjolla biovaihtoehto, jolla päästöjä saisi leikattua pienillä kustannuksilla.

3.4.4 Sähkö

Sähkö on dieselin lisäksi toinen vetureissa yleisimmin käytetyistä voimanlähteistä. Pääsääntöisesti veturi saa sähkönsä radan yläpuolella olevista ajolangoista. Ratapihoille ei kuitenkaan ole aina kannattavaa rakentaa täyttä ajolankaverkostoa, joten ajolangoilla toimiva perinteinen sähköveturi ei ole mahdollinen ratkaisu. Kuitenkin esimerkiksi tehdasalueilla ajolangan voisi rakentaa vain sille raiteelle, josta linjaveturit hakevat tai tuovat junia ja jättää sivuraiteet sähköistämättä.

Vaihtoveturikäytössä on joitakin esimerkkejä, joissa sähköistämättömissä kohteissa käytetään suurta sähköjohtokelaa veturin kyydissä (kuva 31). Näin koko ratapihalle ei tarvitse asentaa ajolankoja. Tällainen ratkaisu sopii lyhyille siirtomatkoille tai esimerkiksi hallien sisälle, jolloin kaapelin pituus jää lyhyemmäksi ja kunnossapito on helpompaa. Myös kelan lämpiäminen ja tehohäviöt johtimessa tulisi ottaa huomioon. Joissain kohteissa kela voisi kuitenkin olla realistinen vaihtoehto.



Kuva 31: Vaihtoveturi virtakaapelikelalla [26]

3.4.5 Akku

Vaihtoveturikäytössä akku energialähteenä voisi olla hyvin toimiva energiamäärän jäädessä yleensä alhaiseksi työskentelyjakson aikana. Asiakaskohtainen mitoitus ja työskentelyjaksojen määrittely täytyy tehdä huomattavasti tarkemmin kuin esimerkiksi dieselmoottorilla. Akuston lataaminen vie kauemmin, ja sen tulee joko riittää koko työskentelyjaksolle tai rakentaa vaihtoakustolla toimiva veturi, joka mahdollistaisi suhteellisen jatkuvan työskentelyn.

Akustoa olisi myös mahdollista ladata käyttämällä sähkömoottoreita generaattoreina eli regeneroida liike-energiaa. Tämä mahdollistaisi myös jarrujen optimoinnin veturin suunnittelussa. Toisaalta tulisi tarkastella energian regeneroinnin hyötysuhde, olisiko sillä realistisesti toiminta-aikaa lisäävää vaikutusta vai miellettäisiinkö se moottorijarruksi.

Täysin akkukäyttöiset veturit ovat vielä harvinaisia, mutta joitakin on kaupallisessa käytössä ja testausvaiheessa. Veturivalmistaja Wabtec sekä BSNF-rautatietieyhtiö ovat kehittämässä yhteistyössä akkukäyttöistä veturia (Liite B).

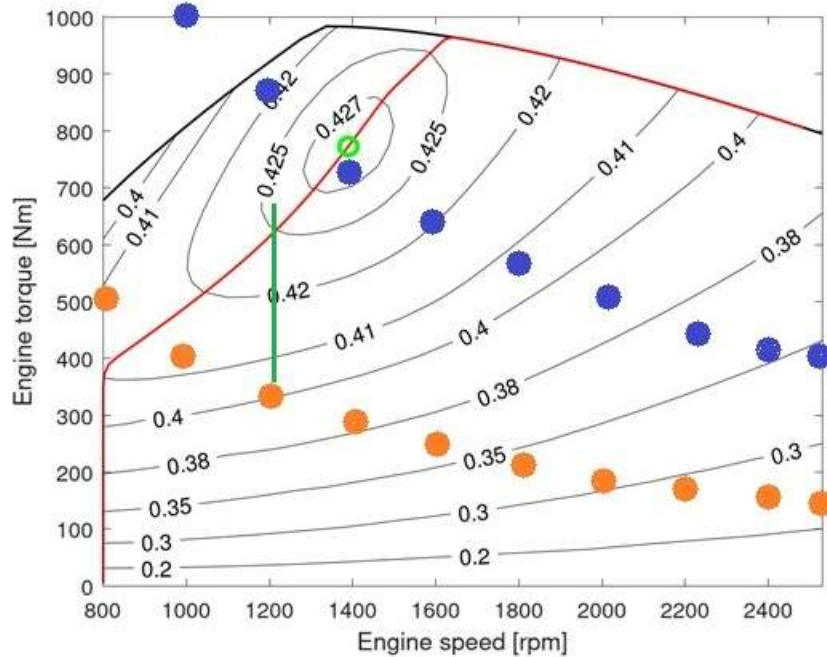
3.4.6 Polttomoottori-akku hybridi

Polttomoottori-akku hybridi on autoissa ja työkoneissa yleistynyt ratkaisu parantaa hyötysuhdetta. Tyypillisesti hybridisaatio on toteutettu joko sarja- tai rinnakkaishybridinä. Sarjahybridillä tarkoitetaan voimansiirtoa, jossa teho siirretään polttomoottorin ja renkaiden välillä sähköisesti. Rinnakkaishybridissä taas polttomoottori on tyypillisesti kytketty mekaanisesti vaihteiston kautta renkaisiin ja sähkömoottori on yleensä kytketty vaihteistoon polttomoottori rinnalle. [23]

Tavallinen diesel-sähköinen veturi voidaan mieltää sarjahybridiksi voimansiirron toiminnan kautta, jossa kaikki ajamiseen käytettävä energia siirretään polttomoottorilta akselille sähköisesti. Diesel-sähköisestä veturista puuttuu vain ajoakusto, jotta se olisi mieltävissä hybridiksi, jossa on ajoakusto. [23]

Luvun 3.1.5 mukaisesti vaihtoveturin työsyklistä hyvin suuri osa on tyhjäkäyntiä ja keskimääräinen teho on hyvin pieni suhteessa veturin maksimitehoon. Vaihtoveturi voisikin hyötyä suuresti hybriditekniikasta, jolloin akustolla tasattaisiin tehopiikit ja dieselmoottori voitaisiin mitoittaa pienemmäksi. Tällöin dieselmoottoria voitaisiin käyttää suuremmalla kuormalla parhaan hyötysuhteen alueella veturin liikuttamiseen tai akuston lataamiseen.

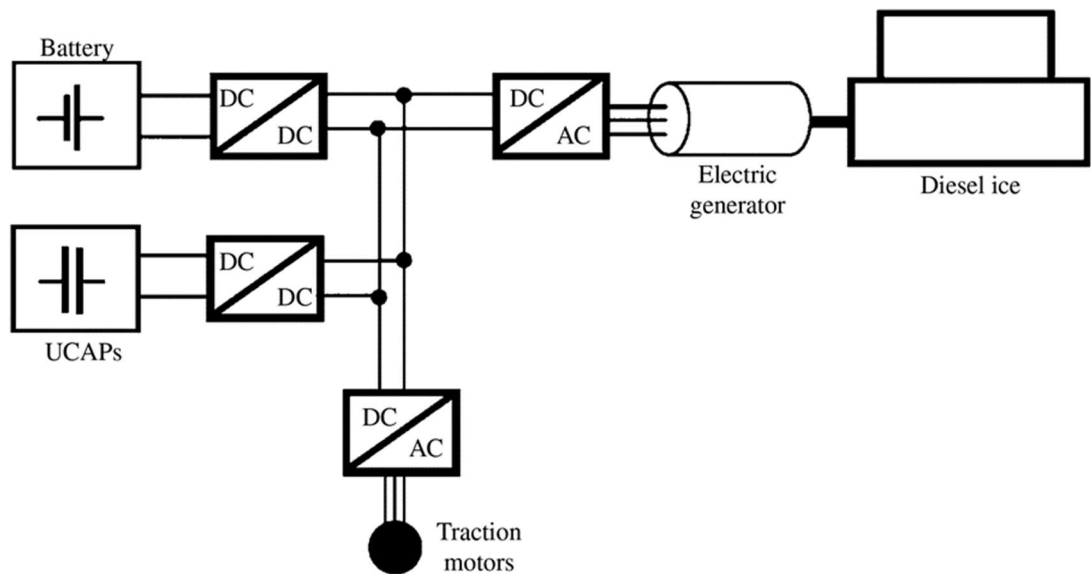
Tätä on havainnollistettu kuvassa 32, jossa sinisellä on 50 % kuormitus moottorin huipputehosta ja oranssilla 20 % kuormitus moottorin huipputehosta. Vihreä viiva kuvaa, kuinka keinotekoisesti kuormittamalla moottoria lisää, voidaan moottorin kuormituspiikettä siirtää paremman hyötysuhteen alueelle. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi lataamalla akkuja. Esimerkiksi tilanne, jossa veturia ajetaan 20 % tehoportaalla akut tyhjänä ja akkuja lataamalla voidaan kuormittaa dieselmoottoria lisää.



Kuva 32: Moottorin kuormituksen lisääminen, muokattu [25]

Polttomoottori voisi olla myös niin sanottu "range extender" eli toiminta-ajan tai -matkan pidentäjä. Tällöin akuston koko voitaisiin optimoida oletetulle työskentelyjaksolle. Mikäli akun energia ei riittäisikään tai työskentelyjakso olisi raskaampi kuin määritetty, voitaisiin polttomoottorilla ladata akustoa tai ajaa veturia loppuaika. Tämän ratkaisun voi mieltää autoista tutuksi plug-in hybridiksi, jolla voidaan ajaa pelkällä sähköllä, mutta polttomoottorin myötä latausajat eivät rajoita ajoneuvon käyttöä.

Kuva 33 esittää diesel-akku hybridiveturin voimansiirron komponentit sekä kytkennät. Kytkenä on hyvin samantyyppinen kuin diesel-sähköisessä veturissa. Poikkeuksena on energian siirtoon käytettävä väylä, johon on nyt liitetty akusto sekä superkondensaattori. Energia pystyy kulkemaan väylää pitkin eri komponenttien välillä kaikkiin suuntiin ja näin voidaan esimerkiksi ladata akustoa regeneroimalla veturin liike-energiaa ajomoottoreilla tai käyttää dieselmoottoria akuston lataamiseen.



Kuva 33: Diesel-akku-superkondensaattori -hybridivoimansiirto [27]

Polttomootoriveturin hybridisaatio olisi mahdollista toteuttaa ehkä jopa helpommin nykyisenkaltaisella hydrostaattisella voimansiirrolla. Tässä polttomootorin vetopäähän asennettaisiin esimerkiksi kuvan 34 kaltainen sähkömoottori polttomootorin ja hydraulipumppujen välille. Tällainen moottori sopii SAE-standardin mukaisen moottorin vetopäähän, jolloin sen olisi pulttikiinnitteinen, eikä vaatisi sovitteita komponenttien välille. Tämä ratkaisu mahdollistaisi myös sekä polttomootorin kuorman keventämisen tuottamalla vääntömomenttia, että kuormittamisen akkuja lataamalla. [28]



Kuva 34: Danfoss EM-PMI375-T200 -moottori/generaattori [28]

3.4.7 Polttokenno

Vety- tai muu polttokenno voi toimia vaihtoveturikäytössä hyvin ja sillä saataisiin paikallisia päästöjä hyvin laskettua. ”Suomessa parhaat mahdollisuudet on vaihtotyövetureissa, jolloin voidaan saada paljon dieselkalustoa pois pieneltä alueelta, ja ilmanlaatu paranee”, toteaa VTT:n tutkija Jari Ihonen Tekniikka & Talous -lehden reportaasissa ”Kuorma liikkeelle vetyvoimalla”. [29]

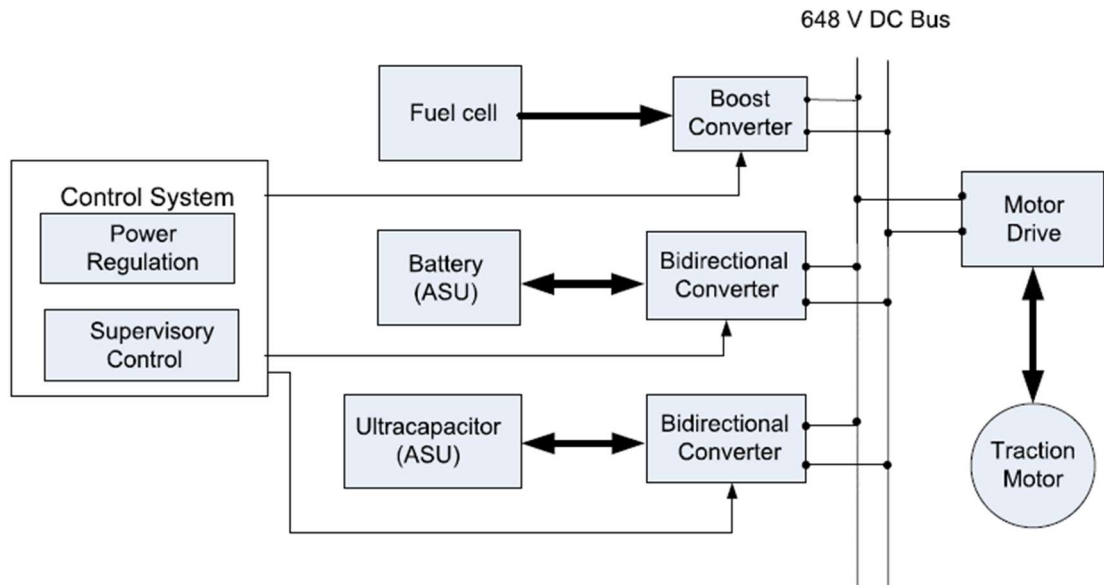
Vety- tai muuhun polttokennoon perustuvia vetureita on jonkin verran kehityksessä esimerkiksi kanadalaisella Ballard Power Systemsillä [30], joka on vetypolttokennojen valmistaja. Polttokennoon pohjautuva veturi olisi hyvin vastaava kuin diesel-sähköinen tai polttomoottori-akkuhybridi. Erona tässä ratkaisussa on, että vetyä tai muuta polttoainetta käytettäisiin suoraan tuottamaan sähköä ilman erillistä generaattoria, joka vaaditaan polttomoottorien yhteydessä.

Polttokennoperustainen vaihtoveturi tarkoittaisi polttokenno-akku hybridiä, sillä polttokennon mitoittaminen suurimman tehontarpeen mukaan ei ole järkevää. Akkujen lisääminen järjestelmään mahdollistaisi polttokennon mitoittamisen pienemmäksi. Tällä energialla ladattaisiin akkuja, jotka tasaisivat tehopiikkien energiatarpeen, samaan tapaan kuin dieselhybridissä.

Polttokennon ”tankkaaminen” olisi nopeaa, eikä työskentelyä tarvitsisi suunnitella yhtä paljoa kuin pelkällä akkuratkaisulla. Toisaalta suuremmalla akulla polttokenno voisi toimia myös toimintamatkan pidentäjänä ja pääosa energiasta ladattaisiin verkkovirralla työskentelyjaksojen välillä.

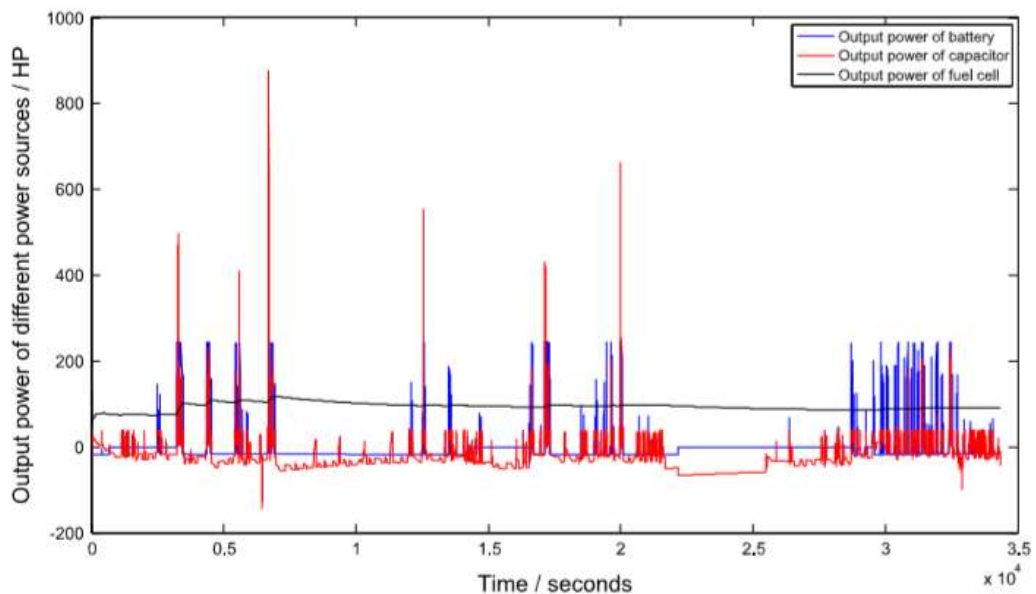
Polttokennoon perustuvan vaihtoveturin toimintaa on simuloitu tutkimuksessa ”Design and modeling of power system for a fuel cell hybrid switcher locomotive” [13]. Tutkimuksessa simuloitiin Norfolk Southernin vaihtoveturista tallennetun työsyklin pohjalta järjestelmää, jossa on polttokennon lisäksi akusto ja superkondensaattori energiavarastoina. Työsykli on näkyvissä kuvassa 10.

Kyseisessä tutkimuksessa käytetty järjestelmä on kuvattuna kuvassa 35, jossa näkyy miten kaikki eri energianlähteet ovat kytkettynä yhteiseen korkeajännitteiseen väylään. Ajomoottori saa sähkönsä tämän väylän kautta. Järjestelmä on hyvin vastaava kuin kuvan 33 diesel-akku hybridijärjestelmä. Suurin ero on tietenkin dieselmoottorin korvaaminen polttokennolla.



Kuva 35: Energian kulku ja järjestelmän kytkennät polttokenno-akku hybridissä [13]

Kuvassa 36 on nähtävillä eri energianlähteiden tehonkäyttö kyseisessä tutkimuksessa. Polttokenno (musta viiva) tuottaa keskimääräisen tehon, kun taas akku (sininen) ja kondensaattori (punainen) hoitavat dynaamisemmat kuormat. Kondensaattori tarjoaa tehon kaikkein suurimpiin dynaamisiin kuormituksen muutoksiin sen toiminnan ollessa nopeampaa kuin akun. [13]



Kuva 36: Eri energiavarojen tehon käyttö [13]

3.5 Ylätason suunnittelu (Voimansiirto)

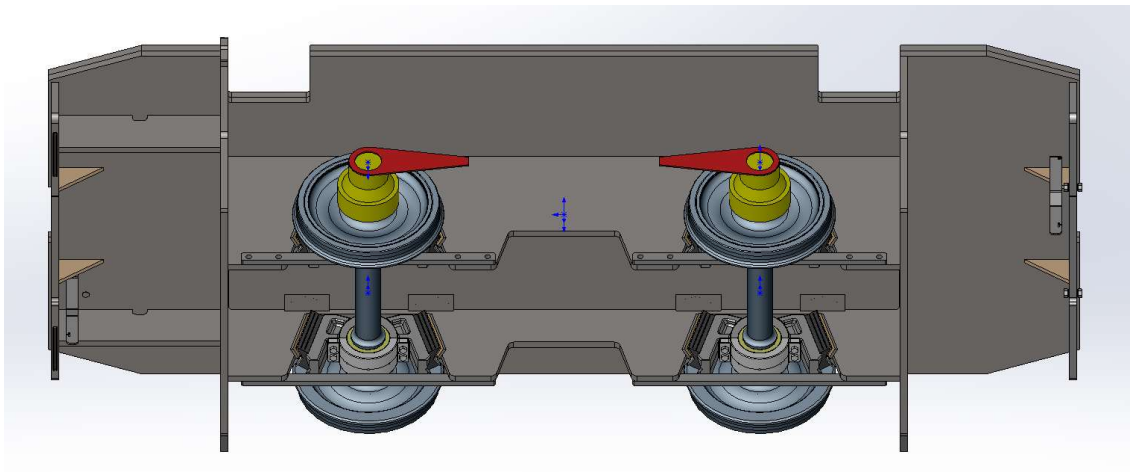
Tässä luvussa esitellään erilaisia tämän diplomityön puitteissa suunniteltuja konsepteja toteuttaa vaihtoveturin voimansiirto. Konseptien joukkoon on otettu tavallisimmat veturien voimansiirtokonseptit, nykyinen voimansiirto sekä joitain uusia konsepteja. Näistä on mallinnettu havainnekuvat, miten kukin ratkaisu olisi sovitettavissa veturiin.

Vaihtoveturin ideana on olla tavallista linjaveturia edullisempi ratkaisu ratapihatyöskentelyyn. Tavallisilla veturikomponenteilla olisi yksinkertaista rakentaa vaihtoveturin voimansiirto, mutta tällöin hintaero tavalliseen veturiin olisi pieni. Hinta on näin ollen yksi tärkeä tekijä voimansiirron ratkaisuja arvioitaessa. Tarkkoja hintoja ei tässä tapauksessa pystytä käyttämään, mutta hintaluokkaeroja voidaan vertailla.

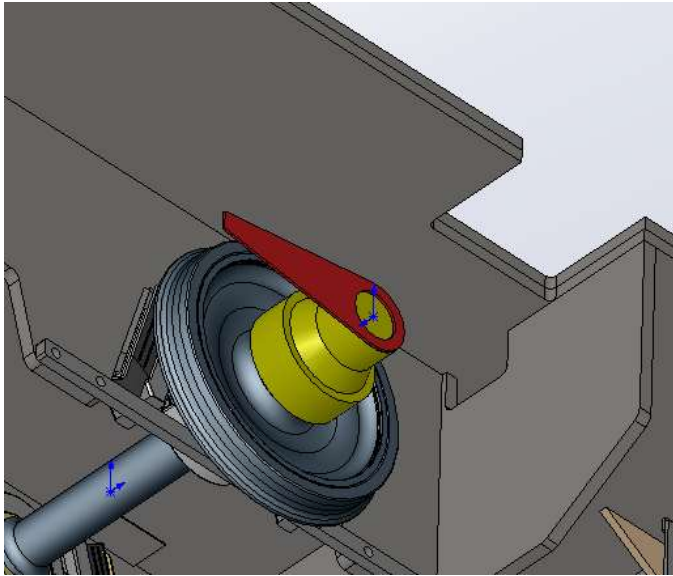
3.5.1 Nykyinen diesel -hydraulinen voimansiirto

OTSO-robotissa on käytetty diesel -hydrostaattista voimansiirtoa, joka on toteutettu suljetuilla hydraulikkapiireillä, joissa kussakin on kaksi hydraulimoottoria rinnankytkettynä. Moottoreina on käytetty Blackbruinin BB6 -radiaalimäntämoottoreita ja pumppuina Linde HPV-02 -sarjan hydraulipumppuja.

Moottorit ovat sijoitettuna akselien päihin kuvien 37 ja 38 osoittamalla tavalla. Kuvissa keltaisella on hydraulimoottori ja punaisella momenttituki. Momenttituki on tuettu joustavasti veturin runkoon. Keltainen hydraulimoottorin tilavuusmalli sisältää myös sovitteen, jolla hydraulimoottorin momentti tuodaan akselin päähän.

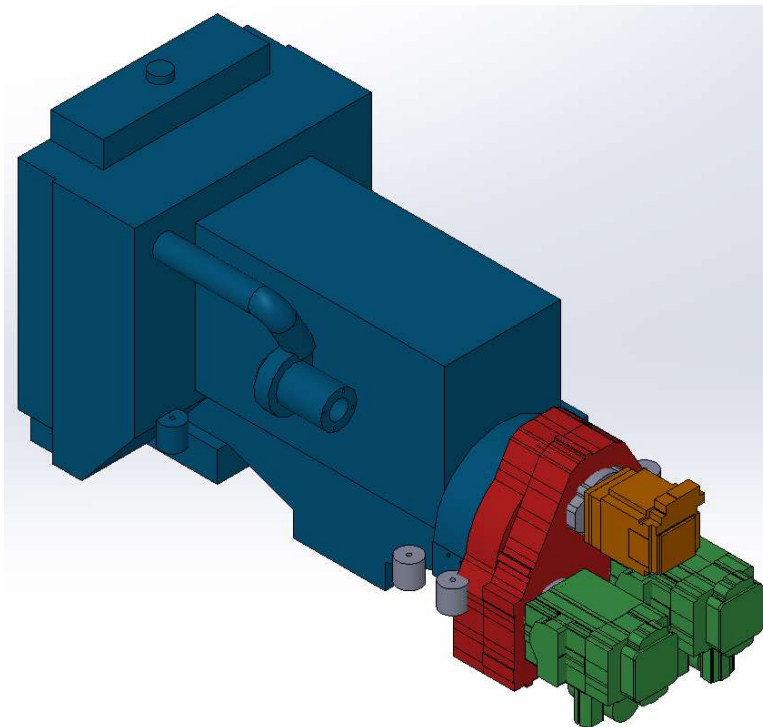


Kuva 37: OTSO-robotin hydrostaattinen voimansiirto



Kuva 38: OTSO-robotin hydrostaattisen moottorin asennus

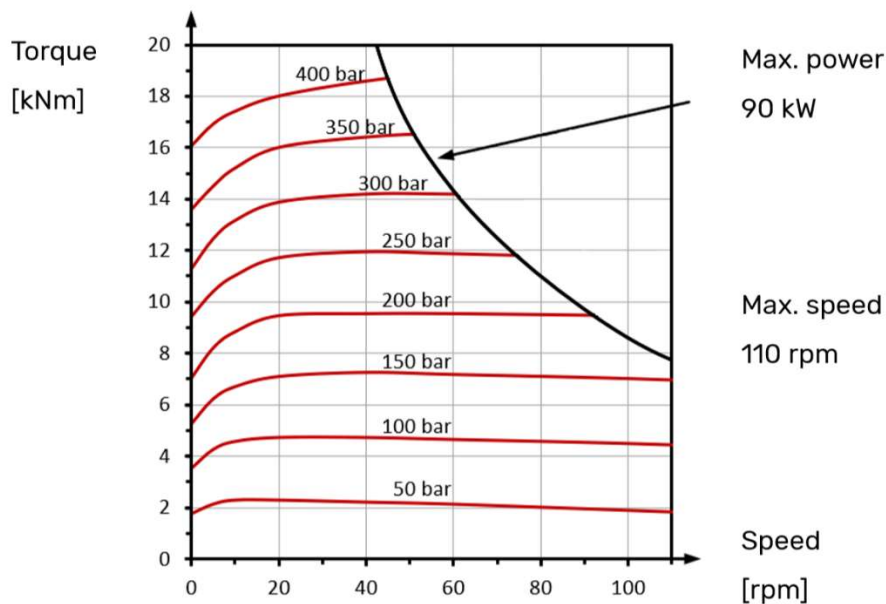
Voima tähän järjestelmään tuotetaan dieselmoottorilla, jonka perään on asennettu jakovaihteiston kautta hydraulipumput. Jokaiselle akselille on oma suljetun kierron hydrauliliikapiiri, joten myös näitä pumppuja tarvitaan yhtä monta. Lisäksi järjestelmässä on yksi pienempi avoimen kierron hydraulipumppu apulaitteille, kuten ilmakompressorille. Kuvassa 39 on esitetty tämä kokonaisuus tilavarauksina. Kuvassa sinisellä on dieselmoottori, punaisella jakovaihteisto, oranssilla avoimen kierron hydraulipumppu ja vihreällä kaksi suljetun kierron hydraulipumppua.



Kuva 39: Dieselmoottori ja hydrauliliikkipumput

Suljetun kierron pumppuina on käytetty Linde HPV02-sarjan hydraulipumppuja. HPV-sarjanpumput ovat säätötilavuuspumppuja erityisesti suljetun kierron hydraulijärjestelmiin. Tyypiltään ne ovat aksiaalimäntäpumppuja. Hydrauliikkapiirin kierrostilavuuden säätö tapahtuu pumppujen kierrostilavuuden säädöllä. Myös kiskopyörien koerosta aiheutuva akselien pyörimisnopeusero kompensoidaan pumppujen kierrostilavuuden säädöllä.

Kuvassa 40 on esitetty käytettyjen BB6-moottorin vääntökäyrä kierrosluvun funktiona. Veturissa on käytössä BB6-malliston suurimmalla, 3150 ccm, kierrostilavuudella oleva moottori. Maksimipaine järjestelmässä on 400 bar.



Kuva 40: Black Bruin BB6 -moottorin vääntö pyörimisnopeuden funktiona [31]

Kullekin akselille on sijoitettu kaksi tällaista moottoria, joten maksimivääntö liikkeellelähdössä on noin 32 kNm. Kokemuksen mukaan [9], [32] näillä moottoreilla pyörät ovat enemminkin lähteneet sutimaan, kuin että juna olisi jäänyt paikalleen moottorien väännönpuutteen vuoksi. Tämä sopii hyvin yhteen aikaisemmin määritellyn, akselikohtaisen 0,35 kitkakertoimen avulla saatavan noin 38kNm kitkavoiman kanssa.

BB6-moottoreilla on mahdollista tehdä veturin 2 eri nopeusalueita: hitaampi suuremmalla momentilla sekä nopeampi pienemmällä vääntömomentilla. Hitaampaa on käytetty vetokäytössä ja nopeampaa yleensä siirtoajossa. Nopeampi vaihde toimii myös kevyellä kuormalla vetokäytössä. Vaihteet ovat BB6-moottorissa toteutettu jättämällä osa moottorin männistä käyttämättä ja näin pienennetty kierrostilavuutta. Täydellä tilavuusvirralla maksimikierrosluku on noin 110 rpm ja vajaalla noin 145 rpm. Vastaavat veturin ajonopeudet ovat noin 19 km/h ja 25 km/h.

Samoin kuin sähkömoottorilla, myös hydraulimoottorilla huippunopeus määräytyy vastusvoimien ja moottorin vääntökäyrän leikkauskohdan mukaan. Kuvassa 40 näkyy, miten hydraulimoottorin vääntökäyrä laskee huomattavan nopeasti kierrosluvun noustessa.

Tehon määrää säädetään tässä tapauksessa sekä dieselmoottorin pyörimisnopeudella että hydraulipumpun kierrostilavuudella. Veturille tyypillisesti ”kaasussa” on tietty määrä tehoasentoja, riippuen kohteessa käytettävästä kauko-ohjauksesta, joita kuljettaja vaihtaa tehontarpeen mukaisesti. Näistä jokaiselle on ennalta määritetty moottorin pyörimisnopeus sekä hydraulipumpun asetus. Hydraulipumpun kierrostilavuutta ja dieselmoottorin kierrosnopeutta yhdessä optimoimalla voidaan kullekin tehoportaalalle hakea parhaan hyötysuhteen toimintapiste.

Tämän järjestelmän ehdottomia hyötyjä on sen helppo suunniteltavuus. Sekä dieselmoottori että hydraulikka ovat aktiivisesti jäähdytettyjä järjestelmiä. Näin niiden mitoittamisessa ei tarvitse ottaa huomioon erilaisia käyttösyklejä tai lämpiämistä tehoa tuotettaessa. Lisäksi energiatarpeen määrittäminen käyttäjaksolle ei ole merkitsevää, sillä dieselin tankkausnopeus ei vaikuta työskentelyyn.

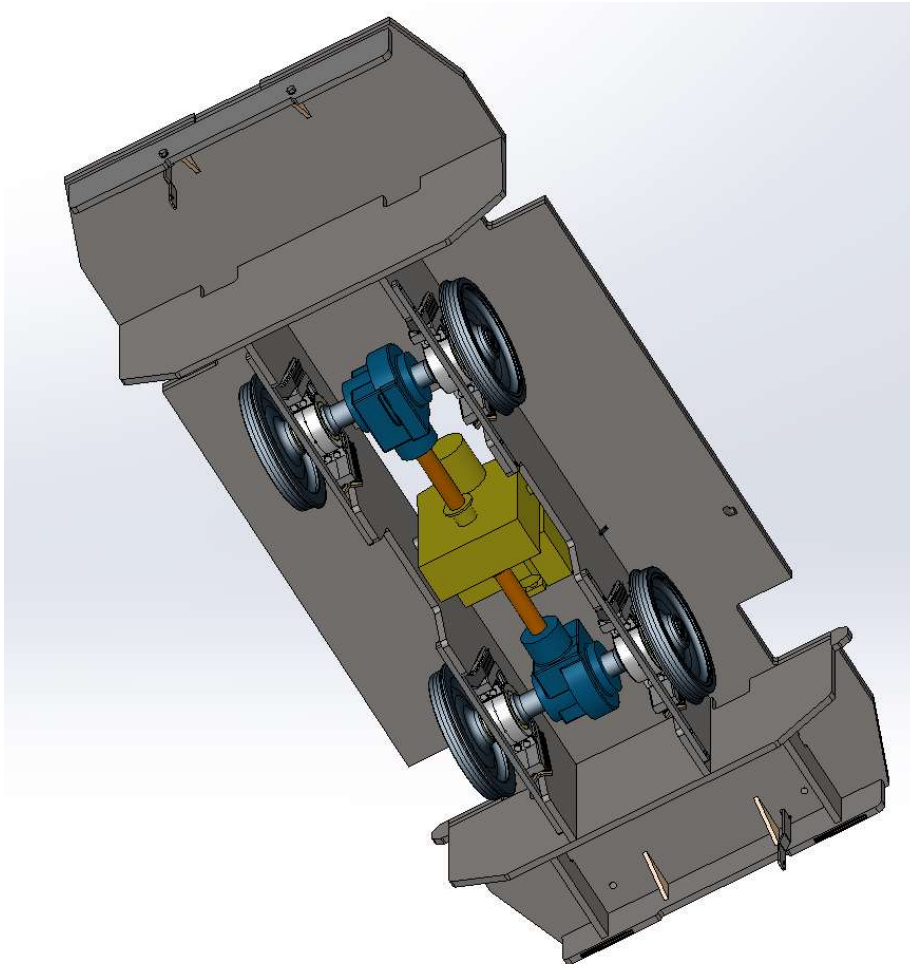
Diesel-hydrostaattinen voimansiirto on käytössä todettu kestäväksi ja vahvaksi. Järjestelmä vastaa hyvin pitkälle esimerkiksi työkonneissa käytettyä suljetun kierron hydrostaattista ajovoimansiirtoa. Näin ollen varaosien saatavuus sekä huollettavuus ovat hyviä. Järjestelmän kokonaishyötysuhde jää kuitenkin melko alhaiseksi erityisesti dieselmoottorin huonon hyötysuhteen vuoksi.

Järjestelmän hyötysuhdetta voisi kasvattaa hyödyntämällä start-stop tekniikkaa. Tällöin dieselmoottoria käytettäisiin vain, kun sen tehoa tarvitaan. Käytetyissä BlackBruinin moottoreissa on mahdollista käyttää hydraulimoottorin mekaanista irtikytkentää. Tämä mahdollistaisi koko hydraulikan sammuttamisen veturin tai juna ”rullatessa”. Mikäli ilmakompressorit muutettaisiin toimimaan sähköllä ja tällä olisi oma akku, voisi dieselmoottorin pitää sammutettuna hyvin suuren osan työsyklistä, mikäli akustossa olisi virtaa.

3.5.2 Hydrodynaaminen

Luvussa 3.2.4 on esitetty hydrodynaamisen voimansiirron toiminta. Vastaava järjestelmä olisi myös mahdollista rakentaa OTSO-robotiin. 2-akselisessa rungossa vaihteisto tulisi keskelle veturia, josta lähtisi kardaniakselit etu- ja taka-akseleille. Kuvassa 41 on tässä työssä tehty konseptisuunnitelma komponenttien tilavarauksina hydrodynaamisesta voimansiirrosta, joka on koottu Ganz Motorin [33] ja Voithin komponenteista [34]. Kuvassa sinisellä on akselinkäyttölaitteet, oranssilla kardaniakselit ja keltaisella vaihteisto.

3-akselisessa rungossa vaihteiston joutuisi asentamaan veturin etu- tai taka-akselin yläpuolelle, josta lähtisi yksi kardaanit keskimmäiselle akselille ja tästä kardaanit eteen ja taakse. Isommissa, 100 ja 150 malleissa, joissa on kaksi erillistä runkoa, järjestelmä olisi haastavampi toteuttaa. Vaihtoehtoina olisi rakentaa veturi yhdellä tai kahdella vaihteistolla. Yhdellä vaihteistolla toteutettuna veturin runkojen välillä kuljisi kardaaniakseli. Kahdella vaihteistolla koko järjestelmä olisi kahdennettuna mukaan lukien moottori.



Kuva 41: Hydrodynaaminen voimansiirto OTSO-robotin rungossa

3.5.3 Sähkö-hydraulinen voimansiirto

Diesel-hydrostaattinen voimansiirto olisi korvattavissa sähkö-hydrostaattisella voimansiirrolla suhteellisen helposti. Tämä voitaisiin toteuttaa korvaamalla kuvan 39 dieselmoottori yhdellä suurella sähkömoottorilla tai vaihtoehtoisesti asentaa jokaiselle hydraulikkapumpulle oma sähkömoottori. Tällöin hydraulikkajärjestelmän voisi pitää ajomoottoreiden osalta muuttumattomana ja korvata hydraulikalla toimivat apulaitteet sähkökäyttöisillä.

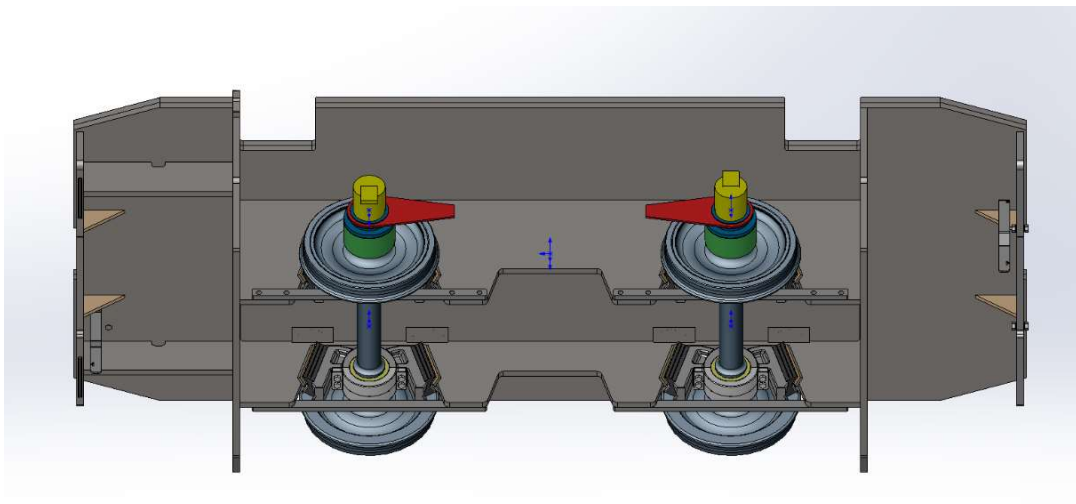
Mekaanisesti tämä ratkaisu olisi hyvin yksinkertainen. Hydraulipumpun ja sähkömoottorin mitoitus täytyisi kuitenkin tehdä uusilla tiedoilla, jotta voitaisiin optimoida järjestelmän kokonaishyötysuhde. Sähkömoottorin hyötysuhde on hyvin pienillä kierrosluvuilla ja suurella vääntömomentilla tyypillisesti melko huono, joten voisi olla kannattavaa asentaa järjestelmään säätötilavuuspumput. Tämä mahdollistaisi sähkömoottorin paremman kuormittamisen ja saattaisi nostaa järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. Toisaalta yhdellä sähkömoottorilla säätötilavuuspumput olisivat pakolliset akselien pyörimisnopeuseron kompensoimiseksi.

Mikäli järjestelmä toteutettaisiin pumppukohtaisilla sähkömoottoreilla, voitaisiin siirtyä käyttämään vakiotilavuuspumppuja. Sähkömoottoreilla voisi toteuttaa tällöin luistoneston sekä kompensoida pyörien kulumisesta aiheutuvan pyörimisnopeuseron ja näin järjestelmän säätäminen helpottuisi.

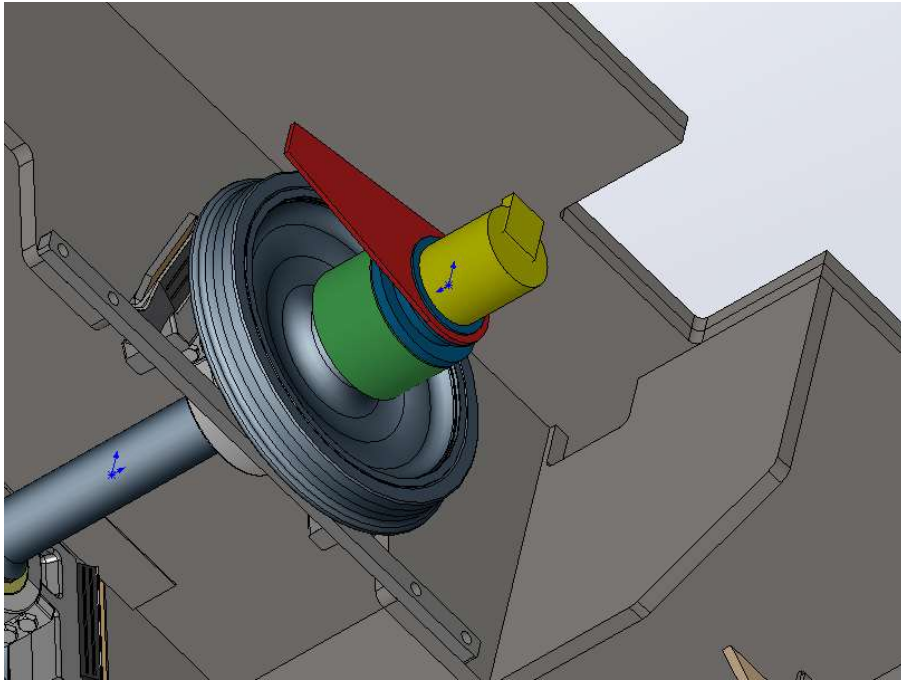
3.5.4 Sähköinen napamoottori

Markkinoille on alkanut tulla hydraulisille napamoottoreille, kuten Blackbruin BB6, sähköisiä vaihtoehtoja. Nämä ovat yleensä sähkömoottorin ja planeettavaihteen yhdistelmiä ja samalla tavalla kuin hydraulisiin, niihin voi suoraan kiinnittää renkaan vanteen. Esimerkiksi Katsalla ja Bosch-Rexrothilla on tarjolla tällaisia paketteja, ja ainakin Bosch-Rexrothin komponentit ovat jo sarjatuotantokäytössä ajoneuvoissa.

Kuvissa 42 ja 43 on esitetty konseptimalli Bosch-Rexrothin moottorista ja vaihteesta tilavarauksina. Lisäksi on suunniteltu moottorille momenttituki sekä vaihteen ja akselin välille sovite. Kuvissa keltainen on moottori, sininen on planeettavaihde, vihreä on sovite akselin päähän ja punainen on momenttituki. Tämä moottori-planeettavaihde on tarkoitettu korvaamaan pyöränlaakeri samoin kuin Blackbruinin moottori.



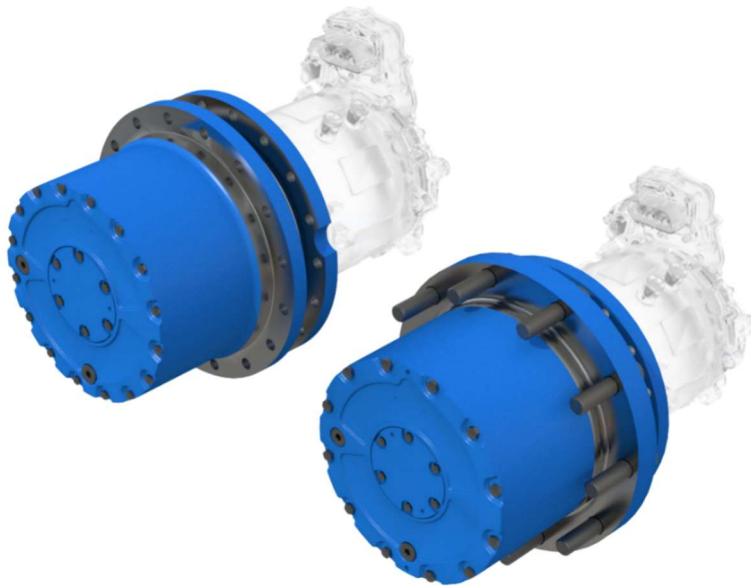
Kuva 42: Sähköinen napamoottori



Kuva 43: Sähköisen napamoottorin asennus

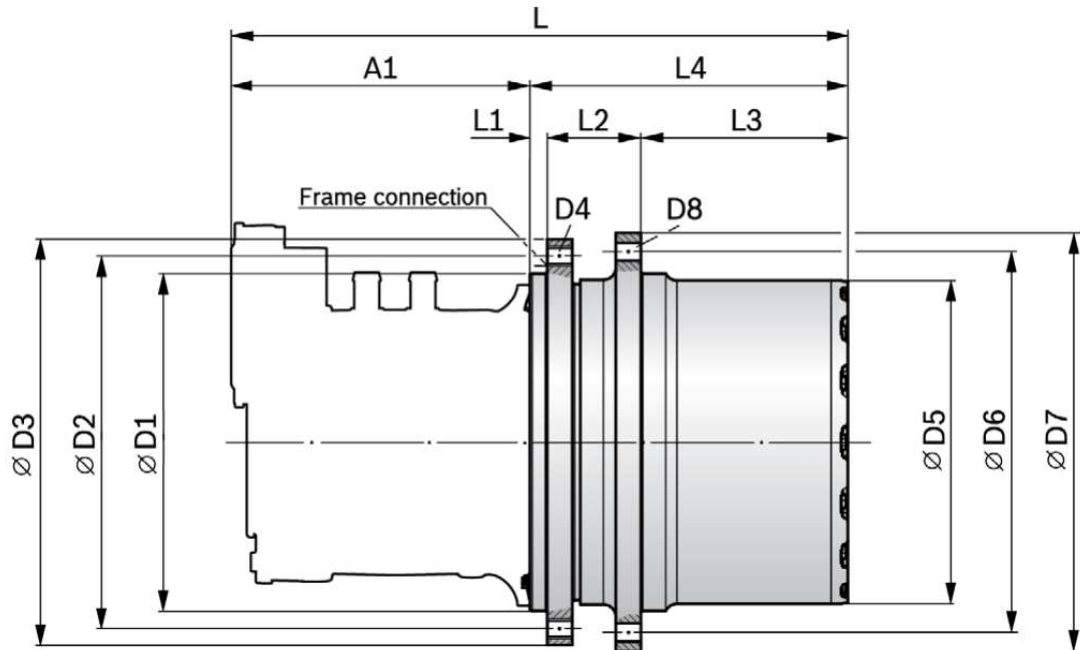
Moottori-vaihde paketin kiinnitys ja toiminta on hyvin vastaava kuin Blackbruinin moottorissa. Paketti olisi sovitettavissa hyvin pienillä muutoksilla nykyiseen OTSO-robotin runkoon. Momenttituen (kuvissa punainen) muotoilulla voitaisiin hyödyntää hyvin pitkälle olemassa momenttituenta veturin rungossa.

Kuvassa 44 on esitetty planeettavaihte sinisellä ja harmaalla on sähkömoottori. Kuvasta on nähtävillä myös renkaan kiinnitykseen tarkoitetut pultit. Vaihde koostuu 3 tai 4 peräkkäisestä planeettavaihteesta, joiden avulla saavutetaan vaihteen suuri välityssuhde. [35]



Kuva 44: Bosch-Rexroth Rotatrac eGFT planeettavaihte [35]

Kuvassa 45 on esitetty kyseisen moottori-vaihepaketin sivukuvanto. Momenttituen kiinnitys tapahtuisi kuvassa näkyvälle Frame connection -pinnalle ja vanteen kiinnitys D8-pinnalle. Veturin akselin pää tulisi noin D5-tekstin kohdalle. Vanteen kiinnityspinnan ja akselin pään väli on noin 200-300 mm, ja tähän väliin tulisi suunnitella poikkileikkaukseltaan U mallinen sovite. Tämä on kuitenkin suhteellisen helposti toteutettavissa.



Kuva 45: Rotatrac eGFT sivukuvanto [35]

Bosch-Rexrothin ratkaisun erikoisuutena on jopa 14 000 rpm kiertävä sähkömoottori. Tämä mahdollistaa tiheän, noin 1:80 välityksen planeettavaihteessa. Tällöin akselikoh-
taisesti määritetty noin 39 kNm saavutettaisiin jo noin 250 Nm vääntömomentilla per moottori.

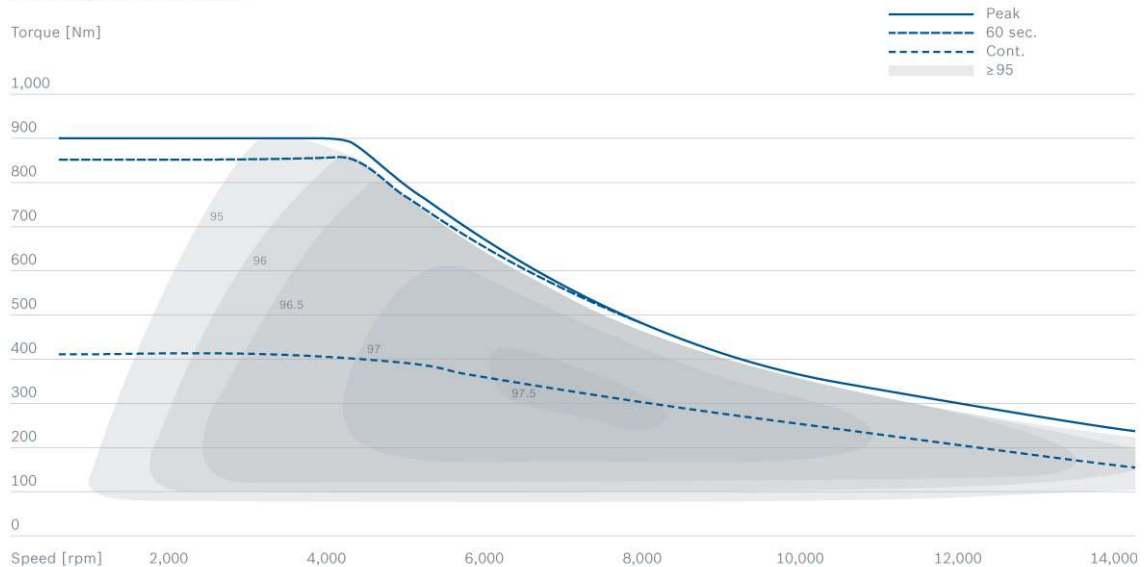
Kierrosluvun noustessa hyvin suureksi sähkömoottorin vääntömomentti laskee. Kuvassa 46 on esitetty Bosch SMG 280/200 -sähkömoottorin vääntömomenttikuvaaja, josta on nähtävissä vääntömomentin huomattava laskua kierrosluvun noustessa. Kuvaajan moottori on vastaavan tyyppinen, mutta suurempaa mallia, kuin mikä OTSO-robotiin so-
piva SMG 220. Vääntömomentin lasku pitää huomata mitoittaessa laitteistoa raskaaseen vetokäyttöön. Luvussa 3.1.5 on esitelty vastusvoimien ja huippunopeuden määrit-
täminen käytettävän vetovoiman ja vastusvoimien suhteen.

Toinen huomioitava seikka on hyötysuhde hyvin pienillä kierroksilla. Veturin suurin haaste on liikkeellelähtö, jolloin ilman luistavaa komponenttia moottori joutuu toimimaan pienellä kierrosluvulla tai nollanopeudessa. Tämä tulee ottaa huomioon erityisesti rajatun energiamäärän sovelluksia mitoittaessa (esimerkiksi akku). Esimerkiksi välityssuhteen

ollessa jo mainittu 80, moottorin pyörii noin 2400 rpm veturin nopeudella 5 km/h (kuva 5). Vasta tällöin saavuttaisiin kuvan 46 mukaisen moottorin hyötysuhdekäyrällä 95 % alueella, tätä pienemmillä nopeuksilla hyötysuhde on huonompi.

Efficiency EM [%] @ 650 V

Torque [Nm]



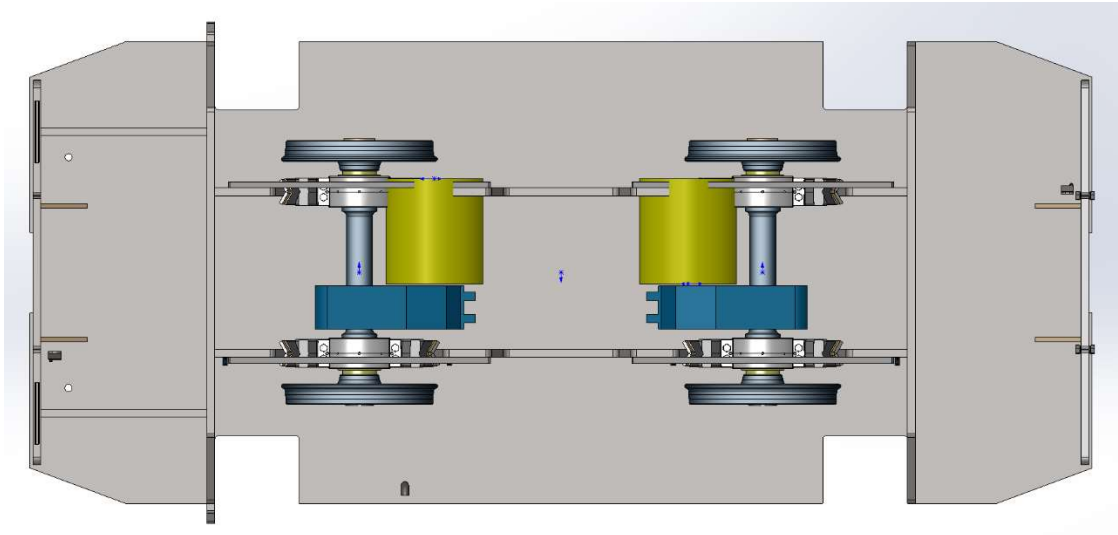
Kuva 46: Bosch SMG 280/200 vääntömomentti- ja hyötysuhdekuvaaja [36]

Ajoneuvo- tai työkonetyöhön suunnitellut moottorit ovat esimerkiksi Boschilla ja ABB:llä nestejäähdytettyjä. Nestejäähdytys parantaa toimintaedellytyksiä hitailla työskentelynopeuksilla. Näissäkin moottoreissa tyypillisesti vain moottorin kuori on nestekiertoisin, ja roottorin lämpiäminen rajoittaa moottorin käyttöä pitkään jatkuvan tehokäyrän yläpuolella ajettaessa, joka on näkyvissä esimerkiksi kuvan 46 Continuous käyränä.

3.5.5 Akselin suuntainen sähkömoottori

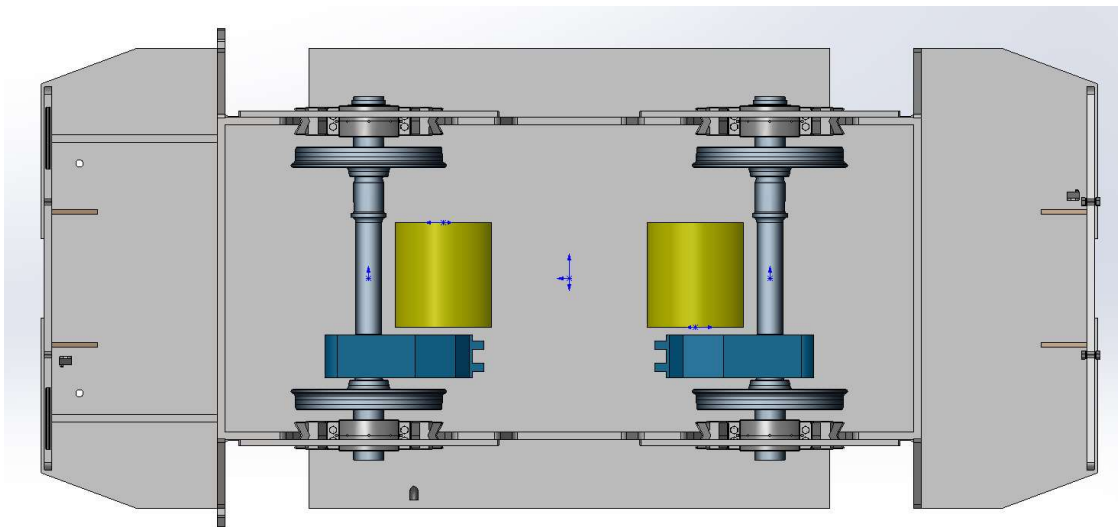
Sähkömoottorin sijoittaminen akselin viereen olisi melko yksinkertainen toteuttaa 2-akselisessa veturissa. 3-akselisen akselit ovat kuitenkin paljon lähempänä toisiaan, jolloin sähkömoottorien ja vaihteiden vaatima tila tulisi ongelmaksi.

Kuvassa 47 näkyy tämäntyyppisen konseptin tilavaraus 2-akselisessa rungossa. Tässä huomataan, että komponentit eivät mahtuisi rungon pitkittäisten osien väliin. Keltaisella näkyvän moottorin tilavaraus vastaa Toshibaa vastaavan kokoluokan vaihtoveturin moottorin äärimittoja [37]. Vaihteen mitat ovat Ganz Motorin [33] vakiovaihteen äärimitat.



Kuva 47: Akselin suuntainen moottori OTSO-robotissa

Akselin suuntaisen sähkömoottorin toteuttaminen vaatisi siis veturin rungon ja akselien laakeroinnin muutosta siten, että laakerit pitäisi siirtää pyörien ulkopuolelle. Kuvassa 48 on nähtävissä muokattu runko sekä siirretyt laakeripesät.

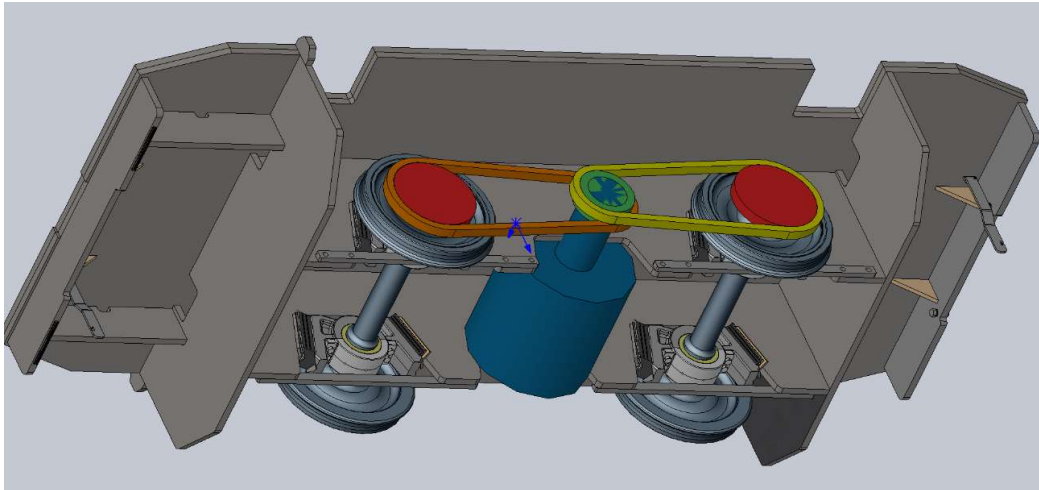


Kuva 48: Akselin suuntaiset moottorit levennetyssä rungossa

Komponenttien puolesta tämä olisi helppo toteuttaa, sillä tähän kävisi valmiit, rautatie-käytössä olevat komponentit sekä sähkömoottorit. Näiden hinta on kuitenkin yleensä korkea, sillä komponentit on suunniteltu tavalliseen veturikäyttöön, joka vaatii huomatta-vasti kestävämpiä komponentteja kuin vaihtoveturi.

3.5.6 Ketjuveto

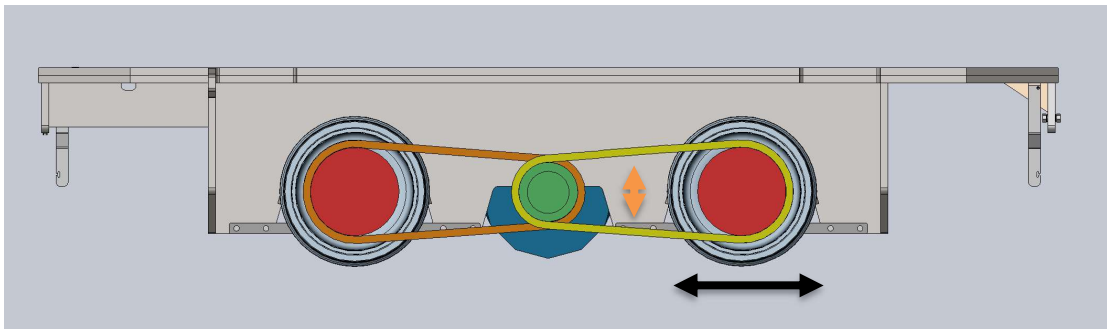
Ketjuveto on joissain vetureissa, kuten Move 4, käytetty ratkaisu. Vaikka ketjuveto saat-
taa tuntua vanhanaikaiselta, se on suhteellisen yksinkertainen tapa toteuttaa voiman-
siirto. Ketjuveto olisi mahdollista toteuttaa 2-akseliseen OTSO-robotiin kuvan 49 esittä-
mällä tavalla yhdellä moottorilla. Kuvassa sinisellä on esitetty sähkömoottori, keltaisella
ja oranssilla voimansiirtoketjut ja punaisella sekä vihreällä ketjurattaat.



Kuva 49: Ketjuvedon toteutus 2-akselisessa veturissa

Moottorin sijoittaminen akselien väliin vähentäisi moottorin akseliin kohdistuvia radiaali-
kuormia huomattavasti, kun lähes vastakkaisiin suuntiin vaikuttavat ketjuvoimat kumoai-
sivat toisensa suurelta osin. Haasteeksi jäisi ketjunkiristimien toteuttaminen, sillä ketjujen
jännittyvä puoli vaihtuu veturin suunnan muuttuessa ja ketju tulisi kiristää löysältä puo-
lelta. Ketjun kiristys on esitetty kuvassa 50 oranssilla nuolella.

Akselit todennäköisesti tarvitsisivat lisätuennan veturin kulkusuuntaan. Chevron-tuen-
nassa akselit pääsevät liikkumaan kuvan 50 mustan nuolen mukaisesti sekä ajodynami-
kan, että ketjuvoimien vaikutuksesta, mikä vaikuttaa suuresti ketjun kireyteen. Tuennan
voisi toteuttaa esimerkiksi yksinkertaisilla molemmista päistä nivelöidyillä vetotangoilla.



Kuva 50: Akselin ja ketjun liikesuunnat

3-akselisen veturin toteutus olisi haasteellinen yhdellä moottorilla tai vaatisi useamman moottorin, jotta kaikkien ketjujen kireys saadaan säädettyä. Useamman moottorin toteutuksessa tilankäyttö nousee määrääväksi tekijäksi. Mikäli moottorit eivät mahtuisi rungon alapuolelle, ketjujen kiristys nousee ongelmalliseksi akselien liikkeessä ketjun suuntaisesti ylös-alassuunnassa. Rungon alapuolelle sijoitetuilla moottoreilla ketjuvedon toteutus olisi mahdollinen.

Ketjuvedolla voisi toteuttaa välityssuhteen ketjupyörien kokoeron avulla sähkömoottorin ja akselin välille. Välityssuhdetta kuitenkin rajaa akselin päässä ketjupyörän halkaisija ja moottorin päässä ketjupyörän hampaiden määrä. Lisäksi sähkömoottorin ja ketjupyörän välille voisi asentaa vaihteen, jolloin kokonaisvälityssuhdetta voisi nostaa.

4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa kootaan yhteen löydetyt tulokset. Lisäksi pohditaan näiden eroja sekä toteuttamismahdollisuuksia sekä energianlähteiden ja voimansiirtomallien yhteensovittamista. Ensimmäisenä tutkimuskohteena olivat erilaiset energianlähderatkaisut. Nämä ovat lueteltuna seuraavassa:

- Dieselmoottori
 - a. Tavallinen
 - b. Biodiesel
- Kaasumoottori
 - a. Maakaasu
 - b. Biokaasu
- Polttomoottori-akkuhybridi
- Sähkö
 - a. Sähköjohto
 - b. Akku
- Polttokenno (vety)

Näistä selvästi fossiilisia energianlähteitä ovat diesel ja kaasu sekä näihin perustuvat hybridit. Biodiesel ja biokaasu ovat ei-fossiilisia, mutta tuottavat silti hiilidioksidia. Muut voidaan lukea ei-fossiiliseksi ja hiilidioksidivapaiksi. Kaikkia energianlähteitä on ainakin tutkimusmielessä kokeiltu vaihtovetureissa.

Voiman- tai energialähteen osalta ei voitu tutkimuksessa edetä tämän pidemmälle. Vaihtoveturin energianlähde on asiakkaan päätettävä ominaisuus. Eri energialähteiden sopivuutta OTSO-robotin runkoon ei tarvitse painottaa eri vaihtoehtoja valitessa, sillä kone-suojan sisällä on useita kuutiometrejä tyhjää tilaa, minne on helppo rakentaa mikä tahansa energialähdevaihtoehto.

Yhteistä kaikille energianlähteille on, että kaikista on helppo muuntaa energiaa sähköksi. Joko välillisesti muuttamalla energiaa sähköksi, tai luovuttamalla varastoitua sähköä. Näin ollen sähköpohjaisia voimansiirtokonsepteja painotetaan näiden vertailussa.

Toisena tutkimuskohteena oli voimansiirtokonseptien kehittäminen. Tämän tutkimuksen yhteydessä kehitettiin seuraavat voimansiirron konseptit ja mallinnettiin ne komponenttien tilavarauksina OTSO-robotin runkoon.

- Hydrostaattinen
- Hydrodynaaminen
- Sähkö-hydrostaattinen
- Sähköinen napamoottori
- Akselin suuntainen sähkömoottori
- Ketjuveto

Näistä hydrodynaaminen ja akselin suuntainen sähkömoottori ovat yleisiä ratkaisuja ve-tureissa. Hydrostaattinen on harvinaisempi, erityistapauksissa käytetty, kuten myös ketjuveto. Sähkö-hydrostaattinen sekä sähköinen napamoottori ovat uusia, tämän tutkimuk-sen yhteydessä löydettyjä ratkaisuja. Voimansiirroista hydrostaattinen ja hydrodynaami-nen toimivat luontevimmin dieselmoottorilla. Loput ovat sähköperustaisia.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää voimansiirron toteuttamiseksi konsepteja, jotka

- Sopivat vanhaan runkoon
- Sopivat sekä 2- että 3-akselisiin runkoihin
- Sopivat mahdollisimman monelle energianlähteelle
- Ovat mahdollisimman edullisia
- Täyttävät vetovoimavaatimuksen

Seuraavassa taulukossa 8 pisteytetään eri voimansiirron konseptit näiden ominaisuuksien pohjalta. Pisteytys tapahtuu asteikolla 0-2, 2 ollessa paras kyseisessä kategoriassa ja 0 huonoin.

Taulukko 8: Voimansiirtoratkaisujen vertailu

	Sopivuus vanhaan runkoon	Sopivuus 2 ja 3 akselinen	Energian- lähteet	Hinta	Vetovoima- vaade	Summa
Hydrostaattinen (nykyinen)	2	2	0	2	2	8
Hydrodynaaminen	0	0	0	0	2	2
Sähköhydrostaattinen	2	2	2	1	2	9
Sähköinen napamoottori	2	2	2	2	2	10
Akselin suuntainen sähkömoottori	0	1	2	0	2	5
Ketjuveto	1	1	2	1	1	6

Tällä perusteella valinta kohdistuu sähköiseen napamoottoriin. Se on helppo sovittaa olemassa olevaan veturiin, sopii hyvin eri energianlähteille ja täyttää vetovoimavaateen. Hinnaltaan se on hieman kalliimpi kuin hydrostaattinen. Hintaluokka koko napamoottori-perustaiselle voimansiirrolle on 2-akselisessa veturissa noin 50 000 euroa, joka on samassa hintaluokassa ennestään käytetyn hydrostaattisen voimansiirron kanssa. Verrattuna tavallisten veturikomponenttien noustessa yli 100 000 euroon ero on huomattava. Hydrostaattiset sekä napamoottori konsepteina jäävät suunnittelukustannuksiltaan huomattavasti muita matalammiksi, kun runkoa ei tarvitse muokata.

5. YHTEENVETO

Tutkimuksen taustana oli asiakastarve fossiilivapaalla energialla toimivalle vaihtoveturille. Vaihtoveturit ovat tyypillisesti olleet dieselkäyttöisiä eikä ratapihoja voida kustannussyistä sähköistää. Tämä oli lähtökohta ja motivaatio tälle diplomityölle. Työssä käytettiin Suomessa valmistettavaa OTSO-robot -mallistoa esimerkkitieturina.

Tutkimus tehtiin systeemisuunnittelussa käytettävän V-mallin ensimmäisten työvaiheiden mukaisesti. Tämä selkeytti huomattavasti kehitysprosessia ja työn rakennetta. Suunnitteluprojektia voidaan myöhemmin jatkaa tästä eteenpäin siirtymällä V-mallin seuraaviin vaiheisiin.

Diplomityön tutkimusosuus voitiin jakaa kahteen eri osaan. Ensin tutkittiin erilaisia energianlähteitä vaihtoveturille ja toisena voimansiirron konsepteja. Energianlähteiden osalta tutkimuksessa löydettiin useita vaihtoehtoja, joita voidaan tarjota asiakkaille vaihtoehtona tavalliselle dieselille. Voimansiirron osalta löydettiin ratkaisu, joka sopii helposti olemassa olevan veturin rakenteeseen ja mahdollistaa eri energianlähteiden käyttämisen tasavertaisina vaihtoehtoina.

Näiden tutkimustulosten pohjalta voidaan tulevaisuudessa suunnitella asiakastarpeen mukaan eri energianlähteillä toimivia vaihtovetureita. Lisäksi tätä tutkimusta voidaan käyttää pohjana veturien mitoituksessa esimerkiksi työsyklin energiatarpeen osalta. Esimerkiksi akkupohjaisessa järjestelmässä akuston koko on hyvin merkitsevä osa veturin kokonaisjärjestelmän suunnittelua.

Diplomityössä esitettyjä vaihtoveturin tehonkäyttökuvaajia ja päästöstandardeja tutkimalla huomattiin lisäksi, että vaihtoveturin työsyklistä huomattava osa on tyhjäkäyntiä. Hyödyntämällä start-stop -tekniikkaa, voidaan tavallisellakin dieselperustaisella järjestelmällä saavuttaa huomattavia päästö- ja polttoainevähennyksiä. Tämä päivitys olisi mahdollista tehdä myös käytössä oleviin vetureihin.

Voimansiirtojen vertailussa kaksi eniten pisteitä saanutta ratkaisua on mahdollista toteuttaa myös käytössä oleviin vetureihin. Tämä mahdollistaa näiden muuttamisen esimerkiksi polttomoottori - sähkö hybrideiksi, joka vähentäisi veturin päästöjä huomattavasti.

Seuraavia tutkimuskohteita vaihtoveturin ympärillä voisi olla voimansiirron hyötysuhteen optimointi sekä energiamäärän mitoitus työsyklissä laskennallisesti. Energiamäärän mitoitus tosin vaati pohjaksi tarkan hyötysuhdekartan sekä tarkan datan työsyklistä.

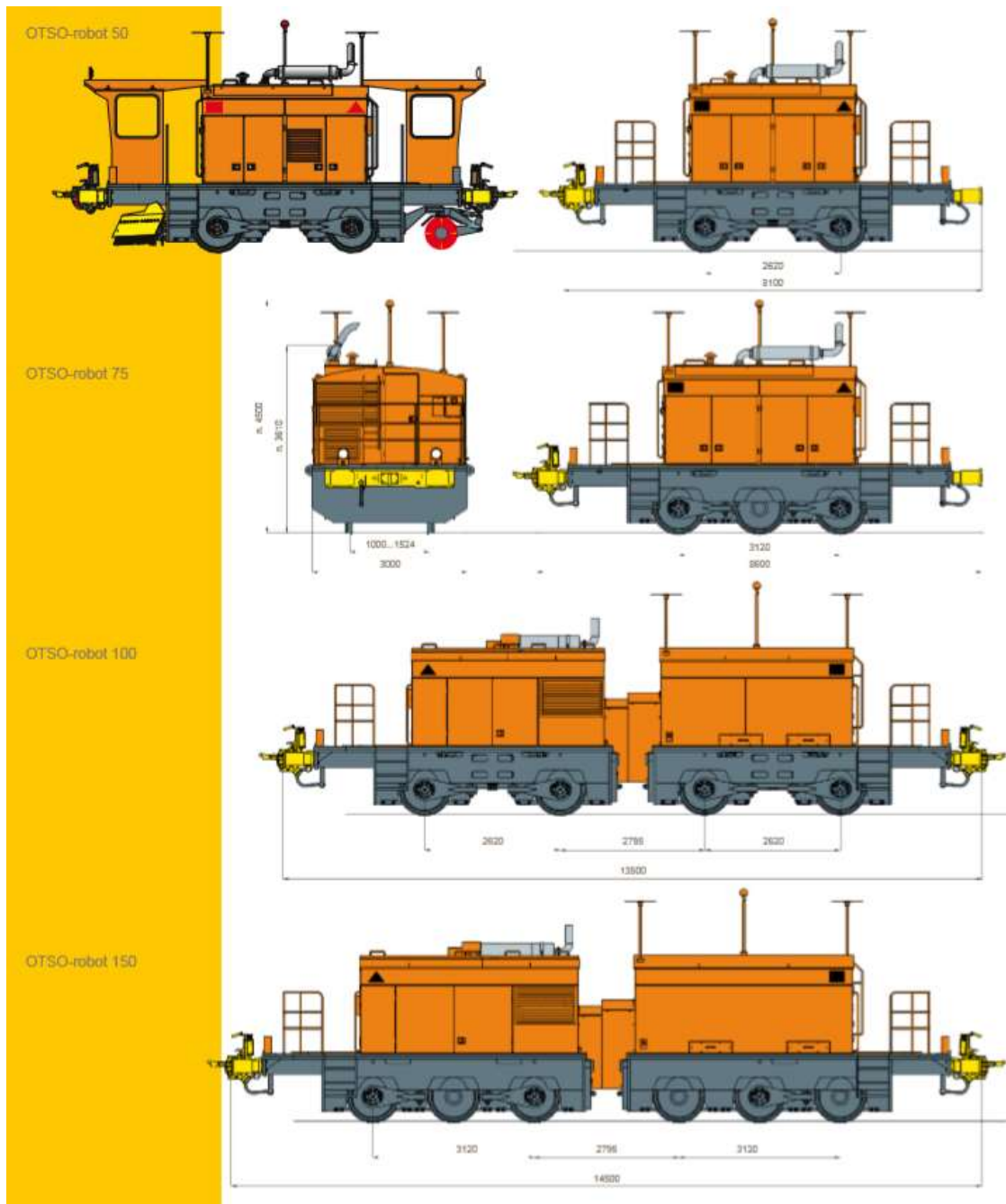
6. LÄHDELUETTELO

- [1] D. Walden, G. Roedler, K. Forsberg, R. Hamelin ja T. Shortell, *Systems Engineering Handbook*, San Diego: INCOSE, 2015.
- [2] I. Haikala ja J. Märijärvi, *Ohjelmistotuotanto*, Helsinki: Talentum, 2006.
- [3] T. Lehtonen, *Designing Modular Product Architecture in the New Product Development*, Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2007.
- [4] SSAB, *Miljörapport år 2006 SSAB Tunnpå AB Borlänge*, Falun, 2006.
- [5] M. Skoglund, *Evaluation of test cycles for freight locomotives*, Tukholma, Ruotsi: School of Electrical Engineering, KTH, 2011.
- [6] Teräspyörä-Steelwheel Oy, *Rautatiekalusto*, Kouvola: Teräspyörä-Steelwheel Oy, 2020.
- [7] Väylävirasto, *Junaliikenteen ja vaihtotyön turvallisuussäännöt (Jt)*, Väylävirasto, 2020.
- [8] Liikennevirasto, *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 21: Liikkuva kalusto*, Helsinki: Liikennevirasto, 2012.
- [9] E. Lindström, Interviewee, *Myynti-insinööri, Teräspyörä oy*. [Haastattelu]. 15 Kesäkuu 2020.
- [10] Fenniarail Oy, "Fenniarail kalusto," 2019. [Online]. Available: <https://www.fenniarail.fi/kalusto/>. [Haettu 02 09 2020].
- [11] I. Iwnicki ja S. Simon, *Handbook of railway vehicle dynamics*, 2006.
- [12] O. Polach, "Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit," *Bombardier Transportation*, Winterthur, 2004.
- [13] L. Guo, K. Yedavalli ja D. Zinger, "Design and modelling of power system for a fuel cell hybrid switcher locomotive," *Northern Illinois University, DeKalb, IL, USA*, 2010.
- [14] Ecopoint inc, "Dieselnet EU:Nonroad Engines," [Online]. Available: <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#rail>. [Haettu 30 10 2020].
- [15] Liikennevirasto, *RATATEKNISET OHJEET (RATO), Osa 2 Radan geometria*, Helsinki: Liikennevirasto, 2010.
- [16] ABB Switzerland Ltd, "ABB Railway: Traction systems for locomotives and high-speed applications," 2018. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/896cf517fcce4406b7a4facb6d6b7d0c/Traction_system_s_high%20power_RevB_180916_web.pdf. [Haettu 1 Syyskuu 2020].
- [17] SKF Group, *Railway technical handbook Volume 1*, SKF Group, 2011.

- [18] K. Knothe ja S. Stichel, Rail Vehicle Dynamics, Tukholma, Ruotsi: Springer, 2017.
- [19] P. Ikkainen ja S. Haapala, "Rautatieliikenteen käyttövoimat tavaraliikenteessä," Liikennevirasto, 2018.
- [20] I. Dincer, J. Hogewaard ja C. Zamfirescu, Clean Rail Transportation Options, Ontario: Springer, 2016.
- [21] SKF Group, Railway technical handbook volume 2 Drive systems, SKF, 2012.
- [22] VR Transpoint, "VR Transpoint: Uudet veturit leikkaavat dieselledon päästöjä," 19 Kesäkuu 2019. [Online]. Available: <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/linked/artikkeli/uudet-veturit-leikkaavat-dieselledon-paastoja-190620190915/>. [Haettu 02 09 2020].
- [23] C. Mi ja A. Masrur, Hybrid Electric Vehicles: principles and applications with practical perspectives, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [24] Traficom, "Rautatietilasto 2018," Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, Helsinki, 2019.
- [25] D. Forsberg ja M. Hall, *Reduced Fuel Consumption of HeavyDuty Vehicles using Pulse and Glide*, Linköping: Linköping University, 2019.
- [26] WINDHOFF Bahn- und Anlagentechnik GmbH, "Windhoff Shunting vehicles," [Online]. Available: <https://www.windhoff.de/index.php/fahrzeuge/shunting-vehicles/?lang=en>. [Haettu 07 Syyskuu 2020].
- [27] G. Abad, Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications, Mondragon, Espanja: John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [28] Danfoss, "Danfoss EM-PMI375-T200 Data Sheet," Huhtikuu 2020. [Online]. Available: <https://assets.danfoss.com/documents/DOC340751967996/DOC340751967996.pdf>. [Haettu 16 Syyskuu 2020].
- [29] R. Leino, "Kuorma liikkeelle vetyvoimalla," *Tekniikka & Talous*, nro 28, pp. 12 - 14, 2020.
- [30] Ballard Power Systems, "Hydrogen Powered Trains: The Next Generation of Shunters?," Ballard Power Systems, 2018.
- [31] Black Bruin inc., *Black Bruin Product manual BB and BBC series*, Jyskä: Black Bruin inc, 2019.
- [32] T. Saalasti, Interviewee, *Omistaja, Saalasti Oy*. [Haastattelu]. 15 Heinäkuu 2020.
- [33] Ganz Motor, "Axle drives and transmissions," Ganz Motor, 2018. [Online]. Available: <https://ganzmotor.hu/products/axle-drives/>. [Haettu 25 Syyskuu 2020].
- [34] Voith Gmbh, "Turbo Transmissions for Rail Vehicles," Voith Gmbh, 2019. [Online]. Available: <http://voith.com/us-en/products-services/drives-transmissions/turbo-transmissions.html>. [Haettu 25 Syyskuu 2020].
- [35] Bosch Rexroth AG, *Planetary gearboxes for mobile applications ROTATRAC eGFT 8000 Series 40*, Dortmund: Bosch Rexroth AG, 2020.

- [36] Robert Bosch GmbH, "Bosch Separate motor-generator SMG 280/200," 2020. [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/commercial-vehicles/powertrain-systems/eregiotruck-electric-drive-solutions/separate-motor-generator/>. [Haettu 08 Syyskuu 2020].
- [37] Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation, "Toshiba Traction and Auxiliary Power Systems," Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation, Kawasaki, 2018.

LIITE A: OTSO-ROBOT MALLISTO



LIITE B: WABTEC AKKUVETURI



FLXdrive

BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE

Wabtec's Battery-Electric Locomotive (BEL) pilot is part of a \$22.6-million grant project with BNSF and the San Joaquin Valley Air Pollution Control District.

The company is designing and building a full-size, 100-percent battery-electric freight locomotive featuring an overall energy-management system, including approximately 20,000 battery cells onboard, which coupled with advanced system-optimization controls (ie Trip Optimizer) will improve performance.

This prototype will be used for proof-of-concept and performance testing. The BEL will operate in a hybrid consist with conventional diesel-electric locomotives on BNSF's 350-mile Barstow-to-Stockton, CA route.

While in the rail yard, the consist will shut down or idle the other locomotives (when possible) and use the BEL to reduce local emissions and noise. Once on the road, the locomotive consist will work behind the scenes to determine the best way to use the battery power. The consist also could choose to "graze" on battery power when the train is cruising through open landscape, saving hundreds of gallons of diesel. The locomotive will recharge in operation through the energy generated from dynamic braking.



WabtecCorp.com



Wabtec's Battery-Electric Locomotive

The BEL is expected to generate 2,400 kilowatt-hours of power and reduce a freight train's total fuel consumption by at least 10 to 15 percent. It also reduces greenhouse gases, particulate matter and NOX by at least 10 percent.

Wabtec and BNSF will begin proof-of-concept and performance testing in late 2020.

BEL is part of California Climate Investments, a statewide program that puts billions of cap-and-trade dollars to work reducing greenhouse gas emissions, strengthening the economy and improving public health and the environment— particularly in disadvantaged communities.



Specifications

Energy Source Lithium-ion Batteries

Size of Battery Unit 20 racks, which consist of approximately 20,000 battery cells
** HVAC system to keep batteries at room temperature in all environments*
** Energy-management system to monitor battery health, charge rates and other conditions*

Energy Capacity 2,400 kilowatt hours

Duration of Full 4400 HP output 30-40 minutes
** Recharges during operation through dynamic braking*

Emissions Reduces the train's emissions by at least 10 percent.

Charging There are two ways the locomotive is charged:
 • Wayside charging station, Stockton, CA
 • Dynamic braking during operation

Weight Maximum Approximately 430,000 lbs

Maximum Speed Approximately 75 MPH

Number of Axles 6
** Battery to supply energy to all four powered axles*

Grant Partners BNSF and the San Joaquin Valley Air Pollution Control District and the California Air Resources Board

Test Date Late 2020

Test Route Barstow-to-Stockton Route

Route Length 350 miles



WabtecCorp.com